

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет \_\_\_\_\_ Приладобудівний \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ Приладобудування \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність(спеціалізація) 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (Інформаційні технології та вимірювальні системи механіки)  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ М.Д.Гераїмчук  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_\_» листопад 2018 р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту**

**Мезенцев Лука Олексійович**

1. Тема дисертації «Дослідження абсолютного вимірювача прискорень»  
\_\_\_\_\_

науковий керівник дисертації проф., д. т. н. Безвесільна О.М. \_\_\_\_\_ ,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «05» листопада 2018 р. № 4078-с

2. Строк подання студентом дисертації 6 грудня 2018р

3. Об'єкт дослідження процес вимірювання гравітаційного прискорення автоматизованим абсолютним гравіметром підвищеної точності  
\_\_\_\_\_

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) автоматизований абсолютний гравіметр підвищеної точності  
\_\_\_\_\_

5. Перелік завдань, які потрібно розробити провести аналіз науково-технічних джерел в галузі АГ; викласти принцип дії та опис конструкції АГ; скласти математичну модель АГ; провести дослідження основних похибок абсолютного гравіметра, надати рекомендації по збільшенню точності АГ; дослідити точнісні характеристики АГ; провести математичне моделювання на ЕОМ рівняння руху АГ; розробити та дослідити структурну схему автоматизованого АГ; провести лабораторні експериментальні дослідження АГ; привести методику проведення експериментальних досліджень АГ

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу матеріали аналітичного огляду (1 арк), схеми (1 арк), складальні креслення (1 арк), графіки (1 арк), презентаційний аркуш (1 арк)

7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_\_\_\_

#### 8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка СТАРТАП-проекту	доц., к. е. н. Бояринова К. О.		

9. Дата видачі завдання 2 листопада 2018р

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літератури	01.11-15.11.2018	
2	Проведення розрахунків та аналізу	16.11-23.11.2018	
3	Розробка стартап-проекту	23.11-28.11.2018	
4	Оформлення пояснювальної записки	28.11-07.12.2018	
5	Оформлення графічної частини	30.11-07.12.2018	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

\* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний

(повна назва інституту/факультету)

Приладобудування

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 621.317 \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ М.Д. Гераїмчук  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ грудня 2018 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістр**

зі спеціальності (спеціалізації) 152 Метрологія та інформаційно-вимірю-  
вальна техніка (Інформаційні технології та  
вимірювальні системи механіки)

(код і назва)

на тему: «Дослідження абсолютного вимірювача прискорень»

Виконав: студент (-ка) 2 курсу, групи ПІ-71мп  
(шифр групи)

Мезенцев Лука Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник проф., д. т. н. Безвесільна О.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Розробка СТАРТАП-проекту доц., к.е.н. Бояринова К. О.

(назва розділу)

(посада, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2018 року

**ВІДГУК**  
**наукового керівника магістерської дисертації**  
**на здобуття освітнього ступеня магістр**

виконаного на тему: «Дослідження абсолютного вимірювача прискорень»  
студентом Мезенцевим Лукою Олексійовичем

(прізвище, ім'я, по батькові)

Дипломний проект відповідає затвердженій темі та завданню на дипломне проектування, складається з 5 аркушів формату А1 та 125 сторінок тексту розрахунково-пояснювальної записки.

Проект виконано у повному обсязі, вчасно, із застосуванням офісних програм та програмного середовища «SolidWorks» та «MathLab». Графічна частина виконана технічно і грамотно, згідно з вимогами до конструкторської документації.

Під час роботи над проектом Мезенцев Л. О. продемонстрував високий рівень самостійності, повні і міцні знання, уміння аналізувати літературні джерела, правильно та обґрунтовано приймати необхідні інженерні та наукові рішення в різних ситуаціях. Студент проявив здатність до творчого процесу та зацікавленість до досліджуваного предмету.

Вважаю, що якість підготовки Мезенцева Луки Олексійовича відповідає вимогам стандарту вищої освіти, можливе присвоєння студенту кваліфікації “магістр” за спеціальністю 152 “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (Інформаційні технології та вимірювальні системи механіки)”.

**Науковий керівник**  
**магістерської дисертації**

Доктор технічних наук,  
професор кафедри Приладобудування

Безвесільна О.М.

**РЕЦЕНЗІЯ**  
**на магістерську дисертацію**  
**на здобуття освітнього ступеня магістр**

виконаний на тему: «Дослідження абсолютного вимірювача прискорень»  
(повна назва теми ДП (ДР, МД))

студентом Мезенцевим Лукою Олексійовичем  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Дана магістерська дисертація присвячена вирішенню актуальної задачі підвищення точності вимірювань прискорення сили тяжіння, шляхом дослідження абсолютного гравіметра.

В роботі розроблено математичну модель абсолютного гравіметра та запропоновано і досліджено нову схему вимірювальної системи АГ, що забезпечує вищу точність вимірювань прискорення сили тяжіння за рахунок використання АГ, підключеного до ЕОМ.

Магістерська дисертація виконана у відповідності до стандартів, самостійно та в повному обсязі. При виконанні роботи автор показав високий рівень знань, уміння аналізувати літературні джерела та застосовувати сучасні інформаційні технології та новітні технічні засоби при виконанні поставлених задач.

Вважаю, що дана магістерська дисертація заслуговує оцінки «відмінно», а її автор, Мезенцев Лука Олексійович, присвоєння кваліфікації магістр з метрології та інформаційно-вимірювальної техніки за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (Інформаційні технології та вимірювальні системи механіки).

**Рецензент**

\_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

## ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на магістерську дисертацію	2	
2	A4	МД.ПЗ	Пояснювальна записка	95	
3	A1	МД.ГД.01	Матеріали аналітичного огляду	1	
4	A1 (A2)	МД. ГД.02 (01...04)	Схеми	1 (2)	
5	A1 (A2)	МД.ГД.03.(01..04)	Складальні креслення	1 (2)	
6	A1	МД.ГД.04.(01..04)	Графіки	1	
7	A1	МД.ГД.05	Презентаційний аркуш	1	
Загальна кількість графічних документів - 6 арк.ф. A1					

				МД.ВМД		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.				Відомість магістерської дисертації	Лист	Листів
Керівн.					1	1
Конс.					КПІ імені Ігоря Сікорського каф. ПБ гр. ПІ – 71мп	
Н/контр.						
Зав.каф.						

# **Магістерська дисертація**

на тему: «Дослідження абсолютного вимірювача прискорень»  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	12
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	14
1.1 Загальні відомості про методи визначення ПСВ .....	14
1.1.1 Статичні методи вимірювання ПСВ .....	15
1.1.2 Динамічні методи вимірювання ПСВ .....	15
Рис. 1.1 Класифікація методів визначення ПСВ.....	17
1.1.2.1 Балістичний метод вимірювання ПСВ.....	18
1.2 Аналітичний огляд літератури.....	19
1.2.1 Різновиди схем АГ .....	19
1.2.2 Основні характеристики балістичних стаціонарних та транспортабельних гравіметрів .....	27
1.3 Структурна схема та принцип дії АГ .....	31
1.4 Математична модель абсолютного гравіметра .....	34
1.5 Аналіз та оцінка похибок АГ .....	39
1.5.1 Склад та структура похибок АГ .....	39
1.5.2 Види похибок АГ .....	42
1.5.3 Джерела похибок при вимірюванні балістичним методом та їх розрахунок.....	45
1.5.4 Точність вимірювання часу й шляху.....	48
1.6 Розрахунок впливів температури та тиску навколишнього середовища на стабільність випромінювання оптичного квантового генератора (ОКГ).....	49
1.7 Розрахунок впливу зміни температури балону газорозрядної трубки .....	51
1.8 Основні недоліки існуючих балістичних гравіметрів .....	52
Висновки до розділу 1 .....	53

					<i>МД ПІ7114 ПЗ</i>	Арк
						8
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		



РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	55
2.1 Умови проведення експериментальних досліджень .....	55
2.2 Експериментальні дослідження абсолютних гравіметрів.....	56
2.3 Моделювання впливу параметрів збурень на роботу АГ .....	64
2.3.1 Перетворення вигляду рівнянь руху АГ для моделювання на ЕОМ .....	65
2.3.2 Алгоритм розв'язання на ЕОМ диференційного рівняння руху АГ .....	66
2.3.3 Аналіз результатів цифрового моделювання рівнянь руху АГ .....	68
2.4 Зв'язок вимірювальної системи з ЕОМ .....	77
2.4.1 Розробка функціональної схеми автоматизації вимірювальної системи	77
2.4.2 Огляд основних функціональних завдань системи автоматизації вимірювань .....	79
2.4.3 Розробка функціональної схеми головного модуля вимірювання динаміки руху тестової маси.....	81
2.4.4 Розробка функціональної схеми модуля збору та формування аналогових сигналів .....	86
2.4.5 Підбір елементів схеми автоматизації вимірювань.....	89
2.4.5.1 Розрахунок параметрів вибору та підбір елементів схеми головного модуля вимірювання динаміки руху тестової маси.....	89
2.4.5.2 Підбір елементів схеми модуля формування та збору допоміжних аналогових сигналів.....	95
Висновки до розділу 2 .....	97
Розділ 3 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....	99
«Абсолютний балістичний гравіметр на шасі».....	99
3.1 Опис ідеї проекту .....	99
Абсолютний балістичний гравіметр на шасі.....	99
3.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	101

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						9
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

3.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту .....	102
3.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	109
3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	112
3.6 Висновки .....	115
Загальні висновки даної роботи.....	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ (мовою оригіналу).....	119

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						10
Змн.	Арк	№ док.м.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$g$	- прискорення вільного падіння
$S$	- координата тіла в момент часу $t$ (інтервал шляху)
$t$	- момент (інтервал) часу
$S_0$	- початкова координата пробного тіла
$V_0$	- початкова швидкість пробного тіла
$m$	- маса пробного тіла
$z$	- вертикальна координата
$\alpha$	- вертикальний градієнт
$f$	- частота проходження інтерференційних смуг
$\Delta$	- різниця ходу інтерференційних променів
$\lambda$	- довжина хвилі світла випромінювання
$N$	- число інтерференційних смуг
$\delta_\lambda$	- похибка мір довжини
$\delta_T$	- похибка мір часу
$F_i^{(z)}$	- множина гравітаційних сил
$F_i^{(i)}$	- множина інерційних сил
$T$	- точність вимірювання
$\delta g$	- систематична похибка
$\Delta g$	- похибка вимірювання прискорення
АГ	- абсолютний гравіметр
ПСВ	- прискорення сили ваги
ОКГ	- оптичний квантовий генератор
Гл	- одиниця вимірювання прискорення сили ваги:
$1 \text{ Гл} = 1 \text{ см/с}^2 = 10^{-2} \text{ м/с}^2$ ( $1 \text{ мГл} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Гл}$ , $1 \text{ мкГл} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Гл}$ )	

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Вимірювання абсолютного показника прискорення сили ваги (ПСВ) з високою точністю необхідне для успішного розв'язання великої кількості наукових задач: визначення форми Землі, побудови моделей руху глибинних мас, оцінки пружної деформації поверхні планети, передбачення землетрусів, винаходження глибинних щільнісних неоднорідностей, пошуку корисних копалин та інше. Для вирішення цих наукових задач призначені гравіметри. Серед них найбільш відомі для наземних вимірювань є балістичні гравіметри.

Сучасні дослідження в області розробки та удосконалення гравіметричної апаратури зосереджені на двох аспектах: перший — підвищення точності вимірювань балістичними та абсолютними гравіметрами шляхом усунення впливу сейсмічних коливань на вимірювання, другий — побудова ефективних автоматизованих систем процесу вимірювань прискорення сили тяжіння.

Найбільш точними є наземні балістичні гравіметри (0,01 мГл). Однак вони не автоматизовані. Для сучасного використання такі низька точність неприпустима. Ось чому актуальним є дослідження можливості підвищення точності балістичного гравіметра [4].

**Мета МД:** підвищення точності та швидкодії вимірювання прискорення сили тяжіння шляхом дослідження абсолютного гравіметра (АГ) та розробка автоматизованої системи вимірювання.

**Об'єкт дослідження:** процес вимірювання гравітаційного прискорення автоматизованим абсолютним гравіметром підвищеної точності.

**Предмет дослідження:** автоматизований абсолютний гравіметр підвищеної точності.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						12
Змн.	Арк	№ доквм.	Підпис	Дата		

### **Основні задачі:**

- провести аналіз науково-технічних джерел в галузі АГ;
- викласти принцип дії та опис конструкції АГ;
- скласти математичну модель АГ;
- провести дослідження основних похибок абсолютного гравіметра, надати рекомендації по збільшенню точності АГ;
- дослідити точнісні характеристики АГ;
- провести математичне моделювання на ЕОМ рівняння руху АГ;
- розробити та дослідити структурну схему автоматизованого АГ;
- провести лабораторні експериментальні дослідження АГ;
- привести методику проведення експериментальних досліджень АГ.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- розроблено математичну модель АГ;
- виявлено та досліджено основні похибки АГ, для кожного виду похибок запропоновано заходи по їх зниженню;
- досліджено роботу автоматизованої системи АГ з передачею даних на ЕОМ.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

- обґрунтовано можливість та доцільність використання АГ;
- показано, що точність АГ у 5 разів вища, а швидкодія у 100 разів краща, ніж у відомих неавтоматизованих абсолютних балістичних гравіметрів;
- запропоновано нові алгоритми та методики досліджень АГ на ЕОМ;

Таким чином, балістичні (абсолютні) методи вимірювань прискорень на даний момент часу знаходяться на стадії плідного розвитку, який характеризується визнанням цих методів, розширенням області їх застосування і пошуком шляхів подальшого вдосконалення.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						13
Змн.	Арк	№ док. ум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Загальні відомості про методи визначення ПСВ

Для вимірювання сили ваги в принципі можуть бути використані найрізноманітніші фізичні явища, пов'язані з дією гравітації. Наприклад, падіння тіла під дією сили ваги в повітрі або рідині, коливання маятника, коливання струни або пружини, переміщення електромагнітних хвиль у гравітаційному полі і т. д. Однак лише деякі з безлічі явищ дозволяють із достатньою точністю визначати значення сили ваги.

Абсолютні вимірювання ПСВ замикаються на безпосередньому вимірюванні прискорення пробної маси, рухаючись в вакуумі під дією сили ваги. Таким чином, визначення абсолютного вимірювання відповідає фізичному визначенню поняття ПСВ, з якого випливає, що точність вимірювань буде тим вища, чим більше різних сил інерційного характеру, які діють на пробне тіло, буде враховано. У відповідності із загальним визначенням поняття прискорення запишемо:

$$g = d^2 S / dt^2, \quad (1.1)$$

звідки випливає, що для абсолютного визначення ПСВ необхідно незалежне вимірювання приросту шляху  $dS$  і часу  $dt$ .

Відносні вимірювання замикаються на визначенні приросту ПСВ  $\Delta g$  між двома пунктами спостережень – вихідним і визначеним. Для одержання  $\Delta g$ , порівнюють показники одного й того ж приладу в цих пунктах. Якщо абсолютне значення прискорення у вихідному пункті не відомо, тоді абсолютних значень прискорення, за допомогою відносних вимірів, одержати не можливо.

Як абсолютні, так і відносні методи мають ряд переваг та недоліків, що визначають у сукупності оптимальну область призначення в гравіметрії тих та інших [9].

					МД ПП7114 ПЗ	Арк
						14
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

Методи вимірювань ПСВ поділяються на статичні (спостереження рівноваги тіла постійної маси, на яке діє сила ваги і деяка, точно виміряна, компенсуюча сила) і динамічні (спостереження за рухом пробного тіла в гравітаційному полі).

### 1.1.1 Статичні методи вимірювання ПСВ

Статичними називаються такі методи, у яких спостерігається зміна положення рівноваги тіла під дією сили ваги й деякої іншої сили, що врівноважує силу ваги. При цьому вимірюваною величиною є лінійне або кутове переміщення тіла. Як врівноважуюча сила може використатися пружна сила твердих тіл (пружин, ниток, мембран і т.п.).

До статичних методів відносяться [11]:

- гіпсометричний — порівняння виміряного тиску атмосфери за допомогою ртутного барометра й гіпсотермометра;
- барометричний — вимірювання висоти ртутного стовпа, що перебуває в рівновазі під дією пружної сили газу й сили тяжіння;
- вимірювання зсуву деякої маси, що перебуває в рівновазі під дією сили тяжіння або якої-небудь іншої сили, наприклад, пружної сили пружини.

В основі статичних методів лежить відоме співвідношення:

$$g = F / m, \quad (1.2)$$

де  $F$  – сила, що врівноважує силу ваги;

$m$  – відома маса.

### 1.1.2 Динамічні методи вимірювання ПСВ

Динамічними називаються такі методи, у яких спостерігається рух тіла під дією сили ваги, при цьому вимірюваною величиною є час.

Динамічні методи вимірювання прискорення ґрунтуються на двох різних принципах:

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						15
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

- вимірювання частоти (або) періоду коливань системи (струнні, маятникові та інші гравіметри);
- вимірювання пройденого шляху і часу вільного падіння тіл (балістичні гравіметри).

В першому випадку ПСВ теоретично пов'язано з вимірювальним періодом згідно наступних виразів:

$$g \approx 4\pi^2 l T^{-2} \text{ (маятниковий),} \quad (1.3)$$

де  $l$  – довжина маятника;

$T$  – період коливань маятника.

$$g \approx 4mM^{-1}lT^{-2} \text{ (струнний),} \quad (1.4)$$

де  $m$  – маса струни;

$M$  – маса підвішеного вантажу;

$l$  – довжина струни;

$T$  – період коливань струни.

У другому випадку:

$$g \approx 2lt^{-2} \text{ (балістичний),} \quad (1.5)$$

де  $l$  – шлях, пройдений пробною масою, при вільному падінні за час  $t$ .

Ці вирази легко узагальнюються виразом:

$$g \approx clt^{-2}, \quad (1.6)$$

де  $c$  – константа.

Для визначення ПСВ в балістичному гравіметрі вимірюється або час  $t$ , за який пройдено відомий шлях  $l$ , або шлях, пройдений за відомий час, або те і інше. В маятниковому гравіметрі вимірюють період коливань маятника  $T$  відомої довжини  $l$ , в струнному – період (або частоту) коливань навантаженої струни довжиною  $l$  [3].

На перший погляд здається простим принципове рішення задачі визначення прискорення, але воно ускладнюється, якщо зважити, з якою точністю необхідно провести вимірювання. При визначенні ПСВ з похибкою  $10^{-8}$  вихідні параметри потрібно виміряти з похибкою, як мінімум, в декілька

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						16
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		



разів менше, а надійні вимірювання з подібною точністю потребують забезпечення високої стабільності умов вимірювань, що є складною багатоплановою задачею.

Наведемо розглянуті методи визначення ПСВ на рис. 1.1.

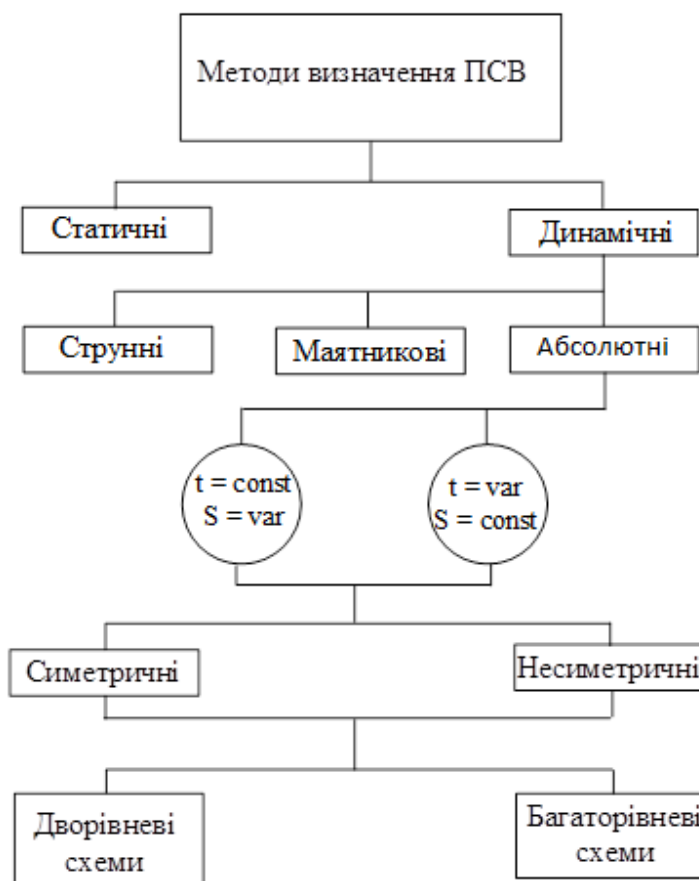


Рис. 1.1 Класифікація методів визначення ПСВ

Реальні гравіметри, а також процеси, що відбуваються в них, значно складніші моделей, що описаних попередніми виразами. При цьому моделі, що описують маятниковий і струнний гравіметри, відрізняються від реальних приладів більш виразно, ніж це має місце у випадку абсолютного балістичного гравіметра. Неадекватні моделі маятникового і струнного приладів перешкоджають врахуванню похибок вимірювання та їх виключенню з результату, що знижує метрологічну надійність вимірювань. Тому балістичний метод застосовується зараз виключно для абсолютних вимірювань, а маятниковий і струнний використовують переважно в якості відносних. В комплексі приладів основним і найбільш точним, як правило, є

балістичний гравіметр. В дисертаційній роботі будемо аналізувати та вдосконалювати саме його [5].

### 1.1.2.1 Балістичний метод вимірювання ПСВ

Балістичний метод вимірювання прискорення сили тяжіння полягає у вимірюванні довжини шляху, що пройшло вільно падаюче тіло, яке почало свій рух з нульовою початковою швидкістю за певний проміжок часу. На основі залежності довжини шляху від часу визначається прискорення вільного падіння.

В основі балістичного методу, заснованого на визначенні швидкості падіння тіл, лежить закон прямолінійного рівномірно прискореного руху вільно падаючого тіла:

$$S = S_0 + V_0 t + gt^2 / 2. \quad (1.7)$$

де  $S_0$ ,  $V_0$  - координата й швидкість тіла на початку відліку часу;  $S$  - координата тіла в момент часу  $t$ ;  $g$  - прискорення сили тяжіння, що вважається постійним.

В простому випадку, при  $S_0=0$ ,  $V_0=0$  рівняння (1.7) приймає вигляд:

$$S = gt^2 / 2. \quad (1.8)$$

Час і шлях вільно падаючого тіла зв'язані співвідношенням

$$t = \sqrt{2S / g}. \quad (1.9)$$

Однак на практиці користуються більше складною формулою

$$S = V_0 + \frac{gt^2}{2}. \quad (1.10)$$

Щоб позбутися від апріорно невідомої початкової швидкості  $V_0$ , вимірювання проводять протягом двох часових інтервалів  $t_1$  та  $t_2$ .

Тоді із системи двох рівнянь

$$\begin{cases} S_1 = V_0 + \frac{gt_1^2}{2} \\ S_2 = V_0 + \frac{gt_2^2}{2} \end{cases} \quad (1.11)$$

одержимо кінцеву формулу розрахунку  $g$  для несиметричного методу:

$$g = \frac{2(S_2 t_1 - S_1 t_2)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)} \quad (1.12)$$

Кінцева формула розрахунку  $g$  для симетричного методу:

$$g = 2 \frac{S_2 t_1 - S_1 t_2}{t_2 t_1 (t_1 + t_2 + 2\tau)} \quad (1.13)$$

де  $S_1$  і  $S_2$  - вимірювальні відрізки шляху на висхідній та спадній гілках траєкторії пробного тіла;

$t_1$  і  $t_2$  - відповідні відрізки часу;

$\tau$  - “мертвий” час при вершині траєкторії, протягом якого не відбувається вимірювання шляху (затримка).

## 1.2 Аналітичний огляд літератури

### 1.2.1 Різновиди схем АГ

Абсолютний метод вимірювання сили ваги полягає у вимірюванні довжини шляху, що пройшло вільно падаюче тіло, яке почало свій рух з нульової початкової швидкості за певний проміжок часу. На основі залежності довжини шляху від часу визначається прискорення вільного падіння [5].

Найбільш перспективним з погляду підвищення точності, є вимірювання методом вільного падіння тіл. У цьому випадку прискорення сили тяжіння визначають безпосередньо використовуючи природні одиниці довжини й часу: вимірювання шляху, пройденого падаючим тілом, здійснюється інтерферометром (мірою служить довжина хвилі лазера), а вимірювання часу - прецизійним стандартом частоти [25; 26].

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						19
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

До появи лазерів при метрологічних, геофізичних і геодезичних вимірюваннях гравітаційного поля Землі застосовували гравіметри, принцип дії яких заснований на використанні маятника, пружинних ваг або вільно падаючого тіла. Точність вимірювань таких гравіметрів оцінюється величиною порядку  $10^{-4}$ - $10^{-5}$ . За останні 10 років значно поліпшені характеристики не тільки відносних, але й абсолютних гравіметрів. Абсолютні гравіметри забезпечують точність порядку 1 мкГл. Наприклад, створений абсолютний балістичний гравіметр FG5 з точністю 1 мкГл. Особливо точні гравіметричні прилади для проведення фундаментальних фізичних досліджень, як правило, проектуються в криогенному виконанні з використанням лазерної інтерферометрії. Ці прилади в основному використовуються при спостереженнях опорних гравіметричних пунктів, рішенні завдань геодинаміки, створенні державного спеціального еталона (групового) одиниці вимірювання для гравіметрії, створенні еталонних полігонів для калібрування відносних гравіметрів.

Створення досконалих вимірювачів переміщень, для балістичних гравіметрів, стало можливим після винаходу лазерів, які володіють високою монохроматичністю та когерентністю. Застосування лазерів дозволяє реалізувати спосіб визначення порядку інтерференції методом динамічного підрахунку інтерференційних смуг [11].

Оптична схема установки подібного характеру показана на рис. 1.2.

При переміщенні відбивача на вимірювальну довжину, так як при скануванні оптичної різниці ходу, визначають кількість періодів модуляції, що залежить від швидкості сканування та від довжини хвилі джерела випромінювання, яка для He-Ne лазера складає 0,633 мкм. Висока частота повторення інтерференційних смуг обумовлює використання фотоелектричного способу їх реєстрації.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						20
Змн.	Арк	№ док-м.	Підпис	Дата		

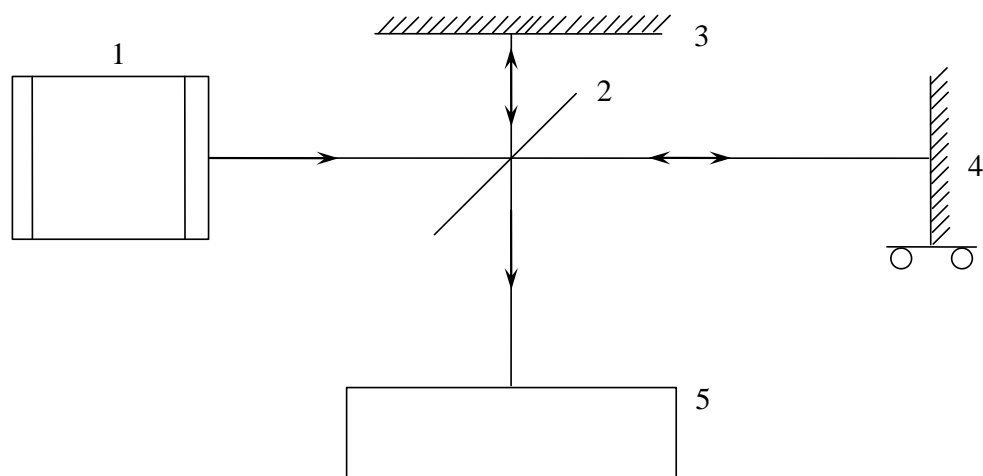


Рис. 1.2 Принципова схема лазерного вимірювача переміщень

1 – лазер; 2 – світло-подільна пластина; 3 – дзеркало;  
4 – рухомий відбивач; 5 – реєстраційний пристрій

Таким чином, широке впровадження у вимірювальну техніку лазерів та фотоелектричних перетворювачів, які модулюють світловий потік в електричні сигнали дозволило створити у нас в країні та закордоном цілий ряд конструкцій лазерних вимірювачів переміщень. Основними перевагами яких є [5]:

- підвищення точності вимірювань;
- скорочення часу вимірювань;
- автоматизація вимірювального процесу;
- зниження рівня підготовки обслуговуючого персоналу.

Конструктивні особливості цього типу приладів достатньо повно можна охарактеризувати на прикладі інтерферометра ІПЛ (інтерферометр переміщень лазерний), схему якого наведено на рис. 1.3.

Виходячи з лазера 1, пучок променів спрямовується призмами 2 і 3 на телескопічну систему 4, відбивається від грані призми 5 та розподіляється пластиною 6 з напівпрозорою поверхнею на два пучки. Робочий пучок, що пройшов через цю пластину, падає на рухому “трипель-призму” 7. Відбивається від граней призми 7 та з’єднується другою напівпрозорою

пластиною 8 з пучком порівнянь, що відбився від поверхні пластини 6. Обидва пучки частково направляються на фотоприймач 10, а частково, після відображення від грані призми 5 - на фотоприймач 12.

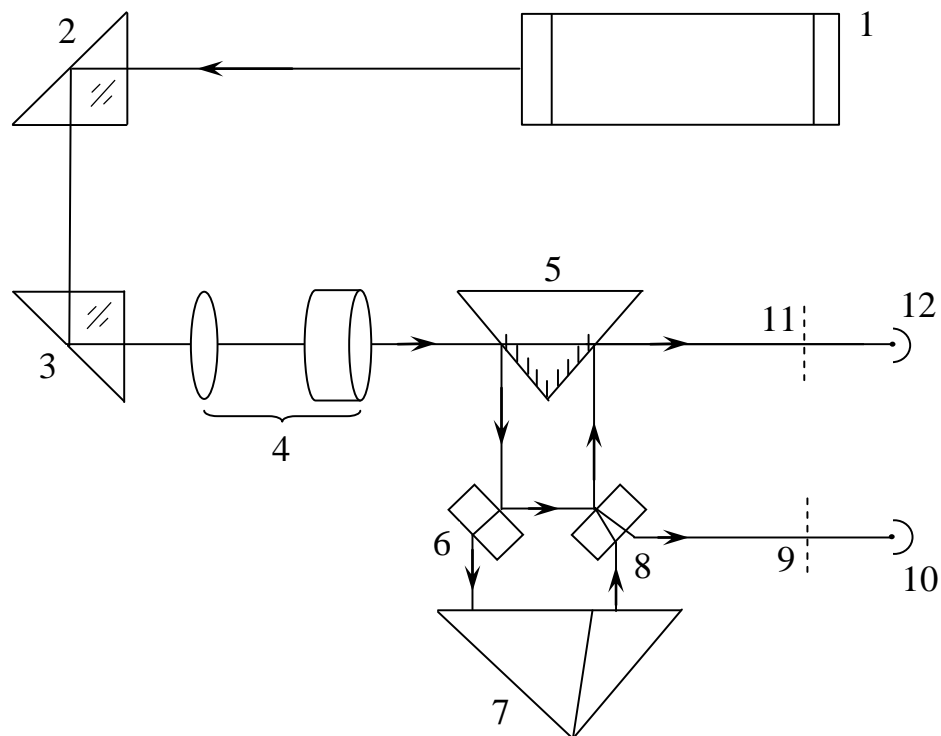


Рис. 1.3 Лазерний інтерферометр ППЛ

Однак, схема цього приладу не позбавлена недоліків. По-перше, інтерферуючі пучки перевернуті по відношенню один до одного. Ця особливість, неприпустима в інтерферометрах зі звичайними джерелами світла. При використанні лазерів це знижує контрастність інтерференційної картини, погіршує її стабільність. З плином часу можливі невеликі зміни напрямку пучка променів, що входять в інтерферометр. Це призводить до зміни ширини та орієнтації смуг. До такого ж результату призводять можливі навіть малі розбіжності у нахилах пластин 6 і 8. По-друге, наявність тільки однієї “трипель-призми” робить обидва пучки променів різнополяризованими. Це ще більше знижує контрастність інтерференційної картини [8].

Ці недоліки відсутні в конструкціях таких вимірювачів переміщень, як інтерферометр фірми “Браун-Бовері” (Braun-Boveri), схему якого наведено на рис. 1.4, та інтерферометр фірми “Тейлор-Хобсон” (Taylor-Hobson) [26].

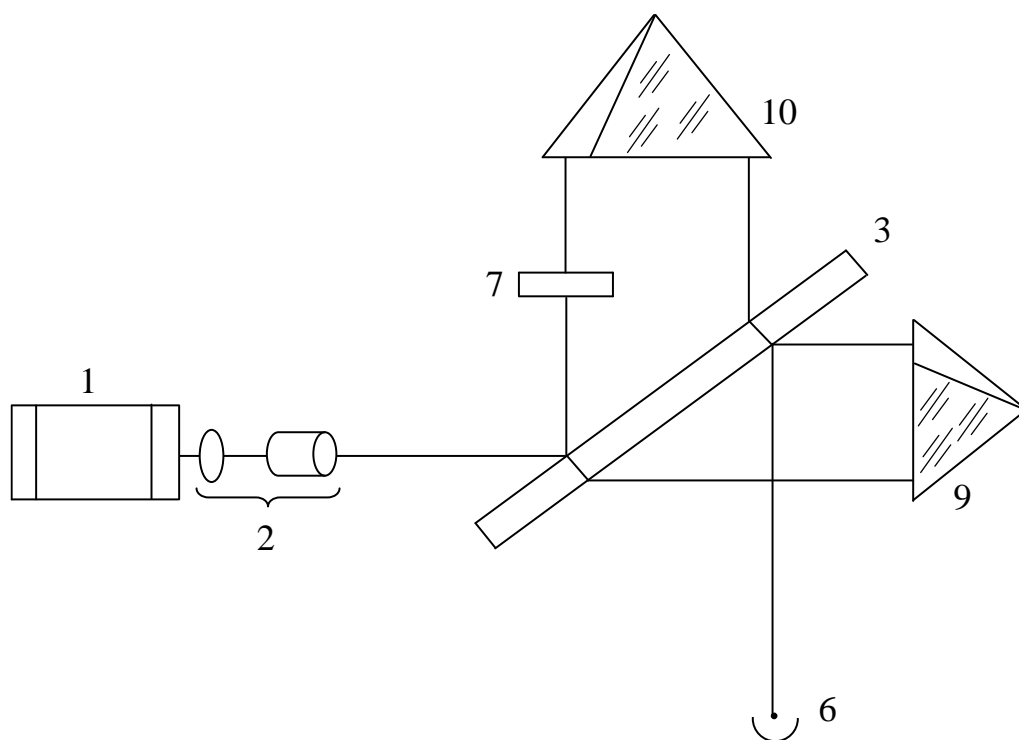


Рис. 1.4 Лазерний інтерферометр фірми “Браун – Бовері”

Як видно з рис. 1.4 паралельний пучок променів, що виходить з лазера 1, направляється телескопічною системою 2 та поділяється пластиною 3 на два пучки, які падають на рухому 9 та нерухому 10 “трипель-призми”. Далі пластина 3 з’єднує відбиті пучки променів та спрямовує їх на фотоприймач 6. Відмінною особливістю інтерферометра є наявність кутових відбивачів в референтному та робочому плечі, що підвищує контрастність інтерференційної картини (підвищуючи тим самим глибину модуляції вихідного світлового потоку) та наявність клиноподібної пластини 7, орієнтація якої визначає ширину та напрямок смуг. Вказані заходи підвищують рівень вихідного сигналу, знижуючи тим самим вимоги до фотоелектричного блоку.

В наведених вище конструкціях інтерферометрів похибка вимірювань довжини визначається похибкою відліку інтерференційних смуг і є значною.

Суттєво покращити метрологічні характеристики інтерферометра дозволила установка Трофімова. В цій установці підвищення точності вимірювання досягається за рахунок визначення довжини з точністю до 0,03 долі інтерференційної смуги. Для цього фотоелектричний блок, який перетворює світловий потік від інтерференційної картини в електричні сигнали, виконується у вигляді чотириканальної системи. Він містить чотири фотоприймача, аналізуючі діафрагми, які розташовані в площині інтерференційної картини. З сигналів формуються лічильні імпульси з дискретністю, яка дорівнює  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/32$  довжини хвилі джерела світла. Необхідна дискретність відліку переміщення задається до початку вимірювання.

Підвищення точності більш простими засобами досягається в інтерферометрі фірми “Кетлер-Хаммер” (Ketler-Hammer) [11], у якому чутливість подвоюється завдяки двократному відбиттю пучка променів від рухомої “трипель-призми”.

Недоліком інтерферометра є те, що вихідний з нього пучок променів частково повертається в лазер і, тим самим, перешкоджає стабілізації його роботи.

Загальна властивість наведених вище схем: положення рухомого тіла визначається відносно опорного плеча. Місце останнього, в силу різних збурюючих впливів (зміна температури, вібрації та інше) може змінюватись, що призводить до виникнення похибки при вимірюванні шляху.

Тому, при використанні інтерферометрів в балістичних гравіметрах, стикаються з проблемами. Балістичні гравіметри роблять в складних кліматичних умовах і при великих збурюючих прискореннях. Крім цього вони повинні бути компактними, легкими та зручними в роботі, доступними для обслуговування персоналом.

Схема, що зображена на рис. 1.4, використовується в лазерних датчиках шляху, що працюють у складі польового гравіметра. Вона відрізняється од відомих аналогів тим, що зсув фази в приймальних каналах

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						24
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		



досягається взаємним поворотом аналізаторів, що виділяє інтерферуючі пучки з двох циркулярно-поляризованих в протилежних напрямках хвиль. Циркулярна поляризація відбувається за допомогою паралелепіпеда Френкеля. Крім цього інтерферуючі пучки можуть бути не соосні в певних границях, так як на діафрагмі, що встановлена перед фотоприймачем, вони фокусуються довго-фокусною лінзою. Зворотній зв'язок (ЗЗ) з лазерним резонатором усувається геометричною побудовою схеми, так як і в інтерферометрі, який зображено на рис. 1.5.

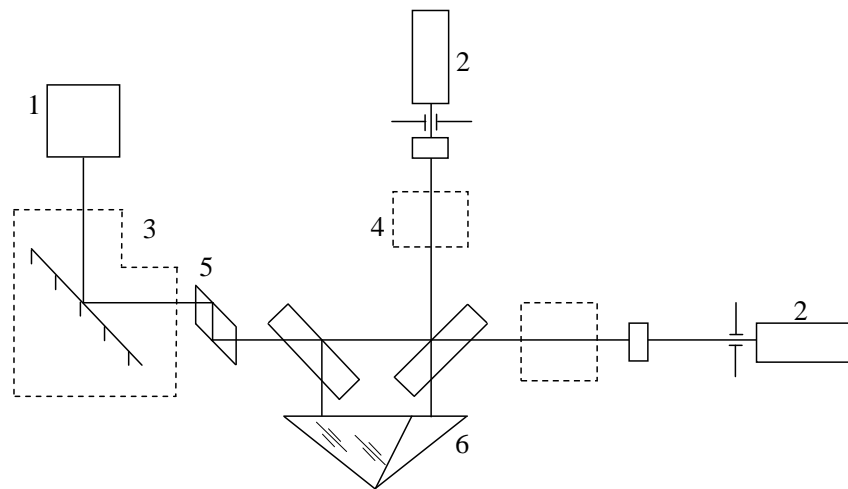


Рис. 1.4 Схема оптична, принципова лазерного балістичного гравіметра

1 – лазер; 2 – фотоприймач; 3 – “коллимирующая” оптична схема; 4 – фокусуюча оптична схема; 5 – паралелепіпед Френкеля; 6 – кутовий відбивач

Схема, яку приведено на рис. 1.5, використовується в лазерному датчику шляху, який працює в умовах значних вертикальних прискорень та дозволяє використовувати динамічний поглинач для компенсації вертикальних прискорень. Схема побудована таким чином, що демпфувальний та робочий кутові відбивачі знаходяться на одній вісі, що є віссю симетрії лазерного датчика шляху. При такому розташуванні компенсуючого плеча в момент нахилу не створюється додаткова вертикальна сила.

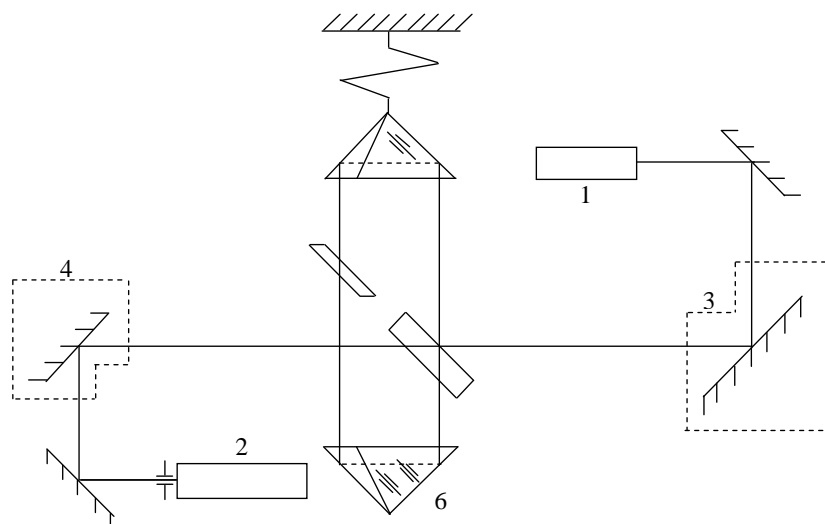


Рис. 1.5 Лазерний датчик шляху балістичного гравіметра:

1 – лазер; 2 – фотоприймач; 3 – “коллимирующая” оптична схема; 4 – фокусуюча оптична схема; 5 – паралелепіпед Френкеля; 6 – кутовий відбивач

Негативним явищем наведених лазерних датчиків шляху балістичних гравіметрів є те, що повне усунення похибок лазерного резонатора можливо лише при точному виготовленню ромба Френкеля, а це є дуже складною задачею практичної реалізації. Вказаний недолік усунено в пристрої для вимірювання абсолютного значення прискорення сили ваги, схема та принцип роботи якого наведено на рис. 1.6. Цей пристрій відрізняється тим, що для компенсації зміщень кутового відбивача 1 застосовується обертаюча оптична система в складі ще одного кутового відбивача 2 та призми 3.

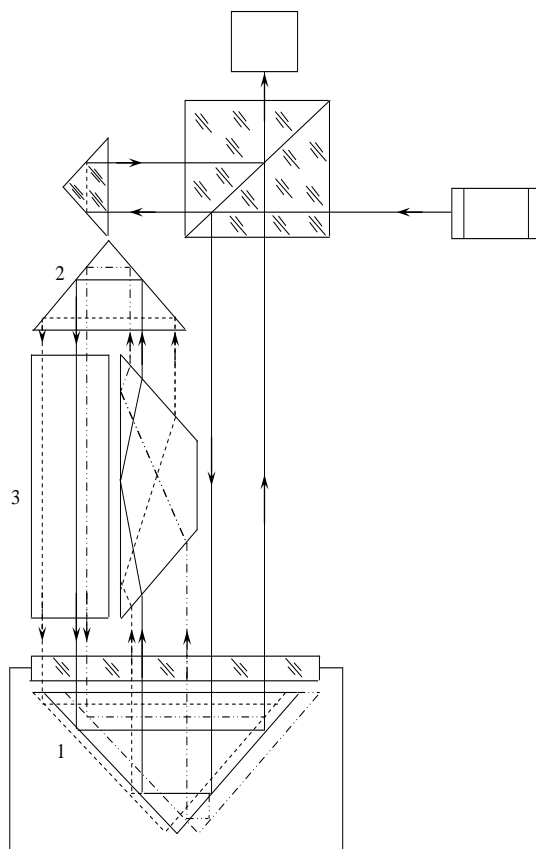


Рис. 1.6 Пристрій для вимірювання абсолютного значення ПВ:

1 – лазер; 2 – фотоприймач; 3 – “коллимирующая” оптична схема; 4 – фокусируюча оптична схема; 5 – паралелепипед Френкеля; 6 – кутовий відбивач

### 1.2.2 Основні характеристики балістичних стаціонарних та транспортабельних гравіметрів

На даний час для проведення абсолютних вимірювань сили тяжіння потрібна велика кількість допоміжного устаткування, тому їх недоцільно проводити при звичайних геодезичних зйомках. Більшість балістичних гравіметрів розміщається в стаціонарних лабораторіях, а спостереження виконуються по спеціально розробленим для цих цілей програмам (інструкціям).

Однак існують і транспортабельні пристрої, що мають прийнятні рівні точності вимірювання. Для успішного функціонування транспортабельних гравіметричних пристроїв необхідно використати високоточні сучасні

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						27
Змн.	Арк	№ доквм.	Підпис	Дата		

системи навігації. В аерогравіметричних зйомках звичайно використовуються бортові радіолокаційні системи з радіолокаційними або лазерними альтиметрами (висотомірами). Для досягнення необхідної точності враховуються також дані, отримані із супутникової системи GPS. При вимірюванні градієнта сили тяжіння (величини зміни прискорення сили тяжіння на дуже малих відстанях) звичайно нехтують врахуванням положення й прискорення самого апарата-носія, однак при цьому використовуються більш складні вимірювальні прилади. Існуючі мобільні системи проведення гравіметричних вимірювань або перебувають на стадії розробки, або (як у випадку гравіметричної системи, розташовуваної на вертольоті) використовуються винятково в геофізичних дослідженнях.

Основні характеристики балістичних стаціонарних гравіметрів наведено нижче в таблиці 1.2, а транспортабельних - в таблиці 1.3 [15].

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						28
Змн.	Арк	№ доквм.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2

## Основні характеристики балістичних стаціонарних гравіметрів

Метод вимірювання g	Фірма виробник	Апаратура та методи зниження впливу вібрацій	Похибка мір довжини $\delta_l$ і часу $\delta_T$ , степінь вакууму Р, мм. рт. ст.	Похибка вимірювання g	
				Інструментальна	По внутрішній збіжності
Симетричний	ІФЗ ім. О.Ю. Шмідта Москва	20-секундний сейсмограф	$\delta_l = 2 \cdot 10^{-8}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P \leq 1 \cdot 10^{-3}$	30 мкГл	40÷70 мкГл (по 10÷20 кидкам за 1 рік)
	ВІРМ, Севр, Франція	П'єзо датчики-компенсатори Демпфування в рідкому маслі, введення поправок за показниками 35-секундного сейсмографа	$\delta_l = 1 \cdot 10^{-9}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P < 1 \cdot 10^{-7}$	3 мкГл	---
	Міжнародна широтна обсерваторія, Мізусава, Японія	Подвійна система компенсації вібрацій. Вимірювання залишкових вібрацій та введення поправок	$\delta_l = 1 \cdot 10^{-11}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P = (1,6 \div 2,8) \cdot 10^{-6}$	30 мкГл	6 мкГл (по 30 кидкам)
Несиметричний	НПО “Метрологія”,	2 зв'язаних пружних	$\delta_l = 3 \cdot 10^{-9}$ (за рік)	15 мкГл	3÷5 мкГл

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						29
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

	Харків, Україна	вертикальних маятники	$\delta_T = 1 \cdot 10^{-9}$ (за рік) $P = 5 \cdot 10^{-6}$		(по 3-м нічним серіям)
--	-----------------	-----------------------	--	--	------------------------

Таблиця 1.3

## Основні характеристики балістичних транспортабельних гравіметрів

Метод вимірювання $g$	Фірма виробник	Апаратура та методи зниження впливу вібрацій	Похибка мір довжини $\delta_\lambda$ і часу $\delta_T$ , степінь вакууму $P$ , мм. рт. ст.	Похибка вимірювання $g$	
				Інструментальна	По внутрішній збіжності
Симетричний	Інститут метрології ім. Г. Колонетті Турин. Італія (встановлення та демонтаж 1 день)	20-секундний сейсмограф. П'єзоелектричні активні компенсатори	$\delta_\lambda = 5 \cdot 10^{-9}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P > 1 \cdot 10^{-6}$	10 мкГл	20÷40 мкГл (по 100 кидкам)
	Інститут географічної зйомки, Токіо, Японія	Пружний підвіс нерухомого відбивача. П'єзодатчики-компенсатори	$\delta_\lambda = 1 \cdot 10^{-9}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P < 4 \cdot 10^{-6}$	15 мкГл	10÷20 мкГл (по 100 кидкам)
Несиметричний	ІА і ЕСО АН СНД, Новосибірськ, Москва (вимірювання на пункті 3-5 днів)	20-секундний сейсмограф	$\delta_\lambda = 1 \cdot 10^{-9}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P < 4 \cdot 10^{-6}$	15 мкГл	10÷20 мкГл (по 100 кидкам)
	Геодезична лабораторія ВПС, Бедфорд Массачусетс США (час розгортання менше доби)	Відсутні	$\delta_\lambda = 1 \cdot 10^{-8}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P < 1 \cdot 10^{-7}$	10 мкГл	3÷10 мкГл (по 150 кидкам) 10мкГл (на пункті за добу)

	Об'єднаний інститут експерименталь ної астрофізики , Боулдер, Колорадо США (час розгортання 2 години)	Активний вібростійкий 60- секундний підвіс	$\delta_{\lambda} = 1 \cdot 10^{-9}$ $\delta_T = 5 \cdot 10^{-11}$ $P = 1 \cdot 10^{-5}$	4,2 мкГл	14 мкГл (по 10 кидкам)
--	--	--	--	----------	------------------------------

### 1.3 Структурна схема та принцип дії АГ

Набір технічних методів та засобів вимірювання шляху і часу дуже різноманітні, проте незважаючи на це, можна описати структуру сучасного абсолютного балістичного гравіметра.

У склад АГ входять:

- інтерферометр, який призначено для перетворення часово-просторових параметрів руху пробного тіла в електричний сигнал;
- вимірювач шляху та часу;
- балістичний блок, в якому реалізується вільний рух пробного тіла;
- прилад врахування або компенсації зовнішніх інерційних перешкод;
- прилад автоматики та управління роботою гравіметра;
- система оперативного контролю працездатності й індикація відмов;
- система контролю та підтримки вакууму;
- система горизонтування;
- ЕОМ;
- блок живлення [5].

Кожний із структурних елементів конструктивно оформлюється у вигляді окремого блоку. На рис. 1.7 наведено спрощену схему одного з сучасних гравіметрів, що працюють за симетричним методом.

Як вільно падаюче пробне тіло 9 звичайно використовують кутову відбиваючу призму. В залежності від способу вимірювання пробне тіло або підкидається пусковим пристроєм 8 (симетричний рух), або відпускається

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						31
Змн.	Арк	№ док. ум.	Підпис	Дата		

магнітним пристроєм, що втримує пробне тіло у верхній частині вертикального плеча інтерферометра за допомогою електромагніта (не симетричний рух). Джерелом світла служить газовий (гелій-неоновий) лазер, вимірювання шляху, пройденого падаючим тілом, здійснюється інтерферометром (мірою служить довжина хвилі лазера), а вимірювання часу - прецизійним стандартом частоти.

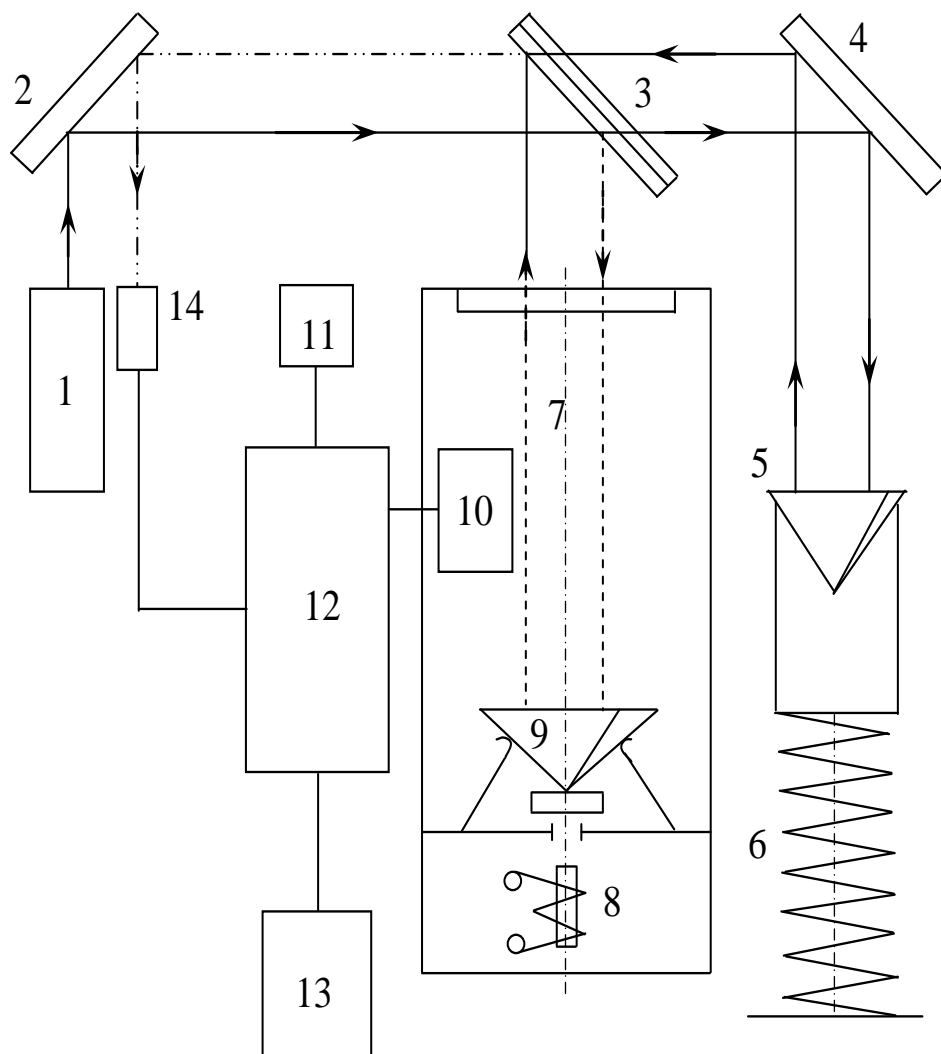


Рис. 1.7 Схема абсолютного балістичного гравіметра

1 – лазер; 2 – дзеркало інтерферометру; 3 – світло-розподільча поверхня (прозоре дзеркало); 4 – дзеркало сейсмографа; 5 – закріплений кутовий відбивач сейсмографа; 6 – довгоперіодичний сейсмограф; 7 – вакуумна камера; 8 – пусковий пристрій; 9 – пробне тіло (кутова відбиваюча призма); 10 – манометр; 11 – генератор міток часу; 12 – мікроЕОМ; 13 – цифродрук; 14 – фотоприймач.

АБЛГ працює наступним чином. Світловий промінь від джерела випромінювання - лазера 1 направляється на прозоре дзеркало інтерферометра 2, відбиваючись від якого направляється на світло-



розподільчу поверхню 3, що в свою чергу розділяє промінь на два пучки. Один з цих пучків (назвемо пучок А) направляється у вимірювальне плече інтерферометра до вільно падаючого пробного тіла 9, що вільно падає у вакуумній камері 7, а інший (назвемо пучок В) - до референтного (нерухомого) кутового відбивача 5. Відбившись від граней призми 9, пучок А направляється назад уздовж шляху паралельно своєму початковому напрямку до світло-розподільчої поверхні 3. У свою чергу пучок В, відбиваючись від кутового відбивача 5 сейсмографа, повертається назад по шляху паралельно своєму початковому напрямку також до світло-розподільчої поверхні 3. Відображені пучки рекомбінують (зміщуються) на світло-розподільчій поверхні 3 і відбиваючись від дзеркала 2 направляються до фотоприймача 14. За допомогою фотоприймача 14 реєструється зміщення інтерференційної картини у вигляді чергування темних і світлих інтерференційних смуг, що викликане переміщенням пробного тіла (призми) 9, і моделюється точна траєкторія, перетворюючись у пари значень моментів часу та дистанцій. Для визначення інтервалів часу  $T$ , проходження заданих інтервалів шляху  $S$  використовують мітки часу 11, сформовані із сигналів рубідієвого стандарту частоти. Ці дані направляються до ПК мікро-ЕОМ 12, де доводяться до придатності для обчислення абсолютного значення  $g$ .

Для врахування впливу рухів земної кори, зменшення впливу вібраційних і сейсмічних перешкод референтний (нерухомий) відбивач 5 лазерного інтерферометра підвішений у центрі хитань низькочастотного сейсмографа 6. Для зменшення впливу обертання пробного тіла (призми) 9 пристрій конструюють таким чином, щоб його центр тяжіння збігався з оптичним центром. Для виключення впливу тертя повітря пробне тіло 9 поміщають у вакуумну камеру 7.

Шлях, пройдений вільно падаючим тілом, визначається числом смуг. Число смуг  $N$  пов'язане з різницею ходу променів  $\Delta$  і довжиною хвилі світла  $\lambda$  співвідношенням  $\Delta = N\lambda$ . Ширина та число інтерференційних смуг залежать

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						33
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

від спектрального складу джерела світла та різниці оптичних шляхів світлових пучків.

Частота  $f$  проходження інтерференційних смуг залежить від швидкості  $V \sim gt$  руху відбивача й пов'язана з  $\lambda$  співвідношенням:  $f = \frac{2V}{\lambda}$ , де  $\lambda$  - довжина хвилі випромінювання. Якщо нижня станція розташована на відстані 1 м від вершини траєкторії, то відбивач перетне цю станцію зі швидкістю  $V \sim gt = \sqrt{2gh} = 44.4\sqrt{l} = \text{см/с} = 444\text{см/с}$ . При  $\lambda = 0,63\text{мкм} = 0,63 \cdot 10^{-4}\text{см}$  максимальна частота проходження інтерференційних смуг складає

$$f = \frac{2V}{\lambda} = \frac{2 \cdot 444}{0,63 \cdot 10^{-4}} = 14 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 14\text{МГц}.$$

#### 1.4 Математична модель абсолютного гравіметра

Задача вимірювання сили ваги балістичними методами зводиться до вимірювання довжини та часу. Це впливає, наприклад, з аналізу розмірності прискорення. Тому математична модель повинна виявити аналітичний зв'язок шляху, пройденого пробним тілом, з часом і зовнішніми збурюючими впливами. Найбільш конструктивним буде такий підхід до побудови моделі, при якому, з однієї сторони, розглядається вільний рух пробного тіла в інерційній системі координат з урахуванням вертикального градієнта ПСВ та сил опору, а з іншої – визначається закон руху деякої зв'язаної системи координат, яка зміщується під дією зовнішніх інерційних впливів і утримує відлікову систему гравіметра [5].

Розгляд вільного руху пробного тіла, що підкинуто вертикально вгору в інерційній системі координат, зводиться до знаходження рішення нелінійного диференціального рівняння 2-го порядку, наступного вигляду:

$$m \cdot z'' = m \cdot (g_0 + \alpha \cdot z) - \gamma_1 \cdot z' - \gamma_2 \cdot (z')^2, \quad (1.17)$$

де  $m$  – маса пробного тіла;

$z$  – вертикальна координата;

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						34
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

$\alpha$  – вертикальний градієнт;

$\gamma_1, \gamma_2$  – коефіцієнти, які визначають вклад сил опору, пропорційних першій та другій степеням швидкості руху пробного тіла відповідно.

Розв'язання рівняння (1.17) методом послідовних наближень із використанням перетворень Лапласа і подальшим розкладом в ряд по степеням  $z$ , отримаємо наступне рівняння:

$$z(t) = g_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot t^n, \quad (1.18)$$

де  $A_n$  – сукупність коефіцієнтів ( $n = 0, 1, 2, \dots, n$ ), які визначаються з умов руху тіла в балістичному блоці відносно відлікової системи.

Отримаємо рівняння руху пробного тіла в інерційній системі координат. В умовах реального виміру ПСВ координата пробного тіла визначається у зв'язаній системи координат, що піддається збуренням. Як відомо, координати пробного тіла в інерційній системі залежать від його координат в зв'язаній системі:

$$\bar{R}_i = \bar{r} + \bar{R}, \quad (1.19)$$

де  $\bar{R}_i$  – радіус-вектор пробного тіла в інерційній системі;

$\bar{r}$  – радіус-вектор пробного тіла в зв'язаній системі;

$\bar{R}$  – радіус-вектор, що описує зміщення зв'язаної системи [5].

Тому, як правило, робота з абсолютним гравіметром здійснюється так, щоб вісь чутливості (у нашому випадку вісь  $z$ ) утримувалася вертикально. Тоді рівняння (1.19) можна спростити:

$$S(t) = z(t) + R_z(t), \quad (1.20)$$

У цьому виразі компонента  $S(t)$  описує поведінку пробного тіла в інерційній системі, а компонента  $R_z(t)$  – вплив зовнішніх збурюючих впливів.

Алгоритми вимірювань ПСВ, що використовують описану модель, дуже різноманітні, як за способом реалізації вільного руху пробної маси, так і за методами вимірювання шляху і часу.

В залежності від способу реалізації вільного руху усі методи можна розділити на дві групи [5]:

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						35
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

- з несиметричним вільним рухом (рис. 1.8);
- з симетричним вільним рухом (рис. 1.8).

При використанні симетричних методів (обидві гілки параболи на рис. 1.8) пробне тіло підкидають вгору, а вимірювання шляху та часу відбуваються на висхідній та низхідній гілках траєкторії. Стартова позиція вільно падаючого тіла перебуває внизу. У початковий момент часу тіло підкидається вгору, далі здійснюються вимірювання переміщень і часу, симетричних щодо верхнього положення, що досягає вільно падаюче тіло. Теоретично така схема, по-перше, знижує вимоги до ступеня вакуумування балістичного блоку (при рухах вгору, а потім униз вплив сили опору залишкового повітря в балістичному блоці на результати вимірювання компенсується); по-друге, збільшує в 2 рази при однакових вертикальних габаритах установки інтервал вимірювань відстаней; по-третє, передбачається, що похибки вимірювання інтервалів часу через інерційну електронну вимірювальну схему компенсуються.

При використанні несиметричних методів (права гілка параболи на рис. 1.8) пробне тіло вільно рухається (падає) в вакуумі. Центр мас вільно падаючого тіла у вихідному стартовому положенні перебуває в точці  $O_1$ . Після відпускання тіла зі стартової позиції вимірювання починаються із затримкою, необхідною для загасання перехідних процесів у вільно падаючому тілі і в системі, що втримувала це тіло у стартовій позиції. У момент проходження вільно падаючим тілом точки  $O$  починається відлік шляху й часу [1].

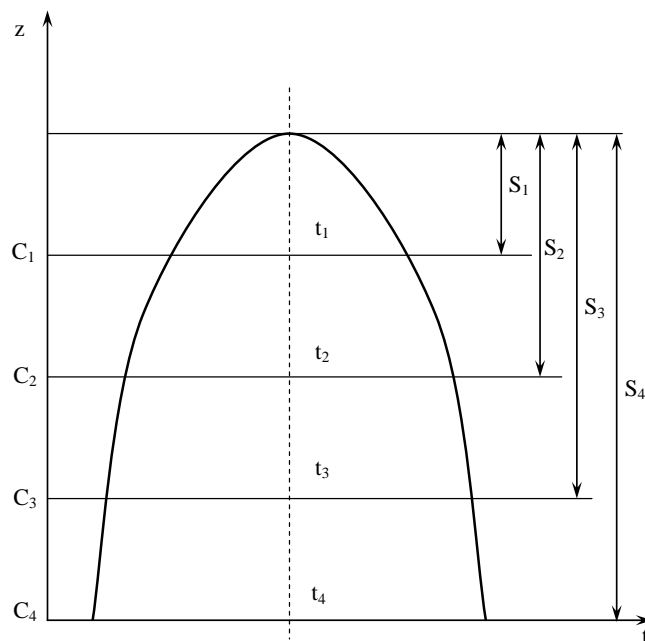


Рис. 1.8 Траєкторія польоту пробного тіла в абсолютному гравіметрі

$C_1 - C_4$  – рівні (станції) спостережень;  
 $t_1 - t_4$  – інтервали вимірювань часу;  
 $S_1 - S_4$  – інтервали вимірювань шляху.

Ці методи відрізняються порівняно простою реалізацією вільного руху і відсутністю необхідності прикладення імпульсної (ударної) сили при запуску пробного тіла, яка залежить від висоти кидання, що значно покращує динамічні умови роботи гравіметра.

До переваг симетричних методів можна віднести можливість майже повного виключення систематичних похибок (що пропорційна першій степені швидкості руху пробного тіла) при використанні порівняно простому алгоритмі вимірювання, а також можливість скорочення вертикальних розмірів приладу, оскільки при одній і тій же висоті абсолютного гравіметра сумарний шлях, пройдений тілом, в даному випадку буде великим. Однак в момент кидка пробного тіла виникає імпульсна реактивна сила, що вносить деяку похибку в результати вимірювань [5].

Зважаючи на наявність невизначених коефіцієнтів  $A_n$  у виразі (1.18), не можливо безпосередньо визначити ПСВ  $g_0$  за виміряними значеннями  $t$  та  $z(t)$ . Для цього необхідно провести вимірювання на декількох інтервалах

спостереження:  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  (рис. 1.8). Тоді замість рівняння (1.11) одержимо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} z_0^* &= A_0 + A_1 \cdot t_0 + A_2 \cdot t_0^2 + ... + A_n \cdot t_0^n \\ z_1^* &= A_0 + A_1 \cdot t_1 + A_2 \cdot t_1^2 + ... + A_n \cdot t_1^n \\ ..... \\ z_i^* &= A_0 + A_1 \cdot t_i + A_2 \cdot t_i^2 + ... + A_n \cdot t_i^n \\ z_N^* &= A_0 + A_1 \cdot t_N + A_2 \cdot t_N^2 + ... + A_n \cdot t_N^n \end{aligned} \right\}, \quad (1.21)$$

де  $z_i^* = z(t_i)/g_0$ .

Проводячи вимірювання на великій кількості інтервалів вільного руху, можна визначити таку кількість коефіцієнтів у рівнянні (1.18), яка необхідна для детального вивчення траєкторії польоту при дослідженні впливу різних факторів на закон руху пробного тіла, оскільки їх кількісний вплив визначається коефіцієнтами  $A_n$ :

$$A_0 = S_0/g_0,$$

де  $S_0$  – початкове положення пробного тіла;

$$A_1 = V_0 / g_0,$$

де  $V_0$  – початкова швидкість пробного тіла;

$$A_2 = 0,5;$$

$$A_3 = \alpha \cdot (S_0 + V_0 \cdot t/3 + g_0 \cdot t^2/12)/2 \cdot g_0;$$

де  $\alpha$  – вертикальний градієнт [5].

Вимірювання на великій кількості інтервалів до недавнього часу відбулося із значними технічними труднощами, у зв'язку з цим зазвичай обмежувалися 2...4 вимірювальними інтервалами. При цьому забезпечували такі умови для експерименту, при яких коефіцієнти  $A_n$  старших порядків виявлялися дуже малими, настільки, що ними можна було б знехтувати.

Через розвиток мікроелектроніки і обчислювальної техніки в наш час практично всі закордонні балістичні та абсолютні гравіметри побудовані за методом вимірювання великої кількості інтервалів часу та шляху.

Подібні розв'язання системи рівнянь (1.21), для різних часткових випадків, можна знайти в різноманітній літературі. Так, симетричний спосіб буде відрізнятися від несиметричного лише значенням початкової швидкості, а багатостанційний від двостанційного – кількістю  $n$  рівнянь. Варіюючи розмірами матриці коефіцієнтів системи рівнянь (1.21) можна одержати усі можливі сполучення умов вимірювань ПСВ за допомогою балістичного методу. Однак, слід зазначити, що симетричний спосіб буде чітким лише при дотриманні повної симетрії інтервалів вимірювань (коли положення точки О на рис. 1.8 буде чітко відомим в просторі або в часі, що принципово неможливо) [5; 9; 18; 15].

Існують наступні методи наближеного симетрування часу  $t$ :

- прямий пошук вершини траєкторії та симетрування часу;
- симетрування шляху, що пройшло пробне тіло, від початку інтервалу вимірювання до вершини траєкторії;
- симетрування по швидкості руху пробного тіла.

Найчастіше використовують другий та третій методи симетрування моментів вимірювання [5].

## 1.5 Аналіз та оцінка похибок АГ

### 1.5.1 Склад та структура похибок АГ

Вільно падаюче тіло рухається у просторі під дією деякої рівнодіючої сили  $\bar{F}$ , що дорівнює векторній сумі всіх сил, відомих в природі: гравітаційних, електромагнітних, аеродинамічних і ін. В цьому випадку:

$$\bar{F} = \sum_i \bar{F}_i. \quad (1.22)$$

Розкладемо множину сил  $F_i$  на дві підмножини: гравітаційні та інерційні сили, які, відповідно, позначимо  $\sum_i \bar{F}_i^{(g)}$  та  $\sum_i \bar{F}_i^{(i)}$ .

При чому будь-яка гравітаційна сила може бути записана у вигляді:

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						39
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

$$F_k^{(z)} = \gamma \cdot \left( \frac{m \cdot M_k}{R_k^3} \right) \cdot \bar{R}_k, \quad (1.23)$$

де  $\gamma$  – гравітаційна стала;

$m$  – маса пробного тіла;

$M_k$  – гравітаційна маса;

$R_k$  – відстань між центрами мас  $M_k$  і  $m$ .

Будь-яка інерційна сила записується так:

$$F_k^{(i)} = \bar{x}_k \cdot m, \quad (1.24)$$

де  $\bar{x}_k$  – парціальне прискорення пробного тіла.

З урахуванням рівнянь (1.23) і (1.24), суму рівнянь (1.22) можна записати у наступному вигляді:

$$\bar{F} = m \cdot \left[ \gamma \cdot \sum_i \frac{M_i}{R_i^3} \bar{R}_i + \sum_i \bar{x}_i \right], \quad (1.25)$$

де величина, що стоїть в дужках, прискорення, що включає ПСВ  $g$ .

Розв'язавши це рівняння відносно  $g$ , одержимо:

$$g_0 = 2 \cdot S \left\| t^2 - \left( \sum_i F_i^{(z)} + \sum_i F_i^{(i)} \right) \right\| \cdot m, \quad (1.26)$$

звідки випливає, що точність визначення  $g_0$ , залежить від точності вимірювання наступних величин:

- шляху  $S$  пробного тіла;
- степені фіксації інерційної системи, відносно якої вимірюють шлях  $S$  (тобто від точності  $S_0$  та  $V_0$ );
- часу  $t$ ;
- гравітаційних сил, що складають множину  $F_i^{(z)}$ ;
- інерційних сил, що складають множину  $F_i^{(i)}$ .

Фактори  $F$  під знаком суми рівняння (1.22) можна умовно розділити на локальні, регіональні та глобальні [10].

До локальних відносяться градієнти гравітаційного поля та температури, електричні і магнітні поля в приміщенні, де відбувається

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						40
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		



робота. До регіональних – зміни гідрологічних умов та висоти місця спостережень, барометричні ефекти, сейсмічна та вулканічна активність в регіоні тощо. До глобальних факторів відносяться, в першу чергу, приливні зміни та, меншою мірою, такі явища, як рух полюсів Землі, нерівномірність обертання планети, астрофізичні явища тощо.

Аналіз рівняння (1.26) дозволяє побачити, що пробна маса в період вільного падіння знаходиться у взаємодії з усіма фізичними об'єктами всесвіту, які за допомогою гравітаційних та інших сил впливають на закон руху пробного тіла. Тому визначення усіх взаємодій є надзвичайно складною задачею.

В сучасній гравіметрії сумарна взаємодія гравітаційних перешкод, за винятком впливу Сонця та Місяця, вважається настільки малим порівняно з рівнодіючою інерційних сил, що ним можна знехтувати [1]. Саме виключення впливу інерційних сил на результати вимірювання гравіметра складає, на даний момент часу, одну з основних труднощів на шляху підвищення точності визначення ПСВ.

Шлях, що пройшла пробна маса вимірюється відносно інерційної системи координат, яка не є абсолютно інерційною. Тому кінематичні похибки можна розділити на дві групи:

- які обумовлені впливом факторів, що діють на пробне тіло;
- які обумовлені впливом факторів, що діють на інерційну систему відліку координат пробної маси.

Сукупність показників вказаних похибок дозволяє визначити структуру показників балістичного гравіметра (рис. 1.9).

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						41
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

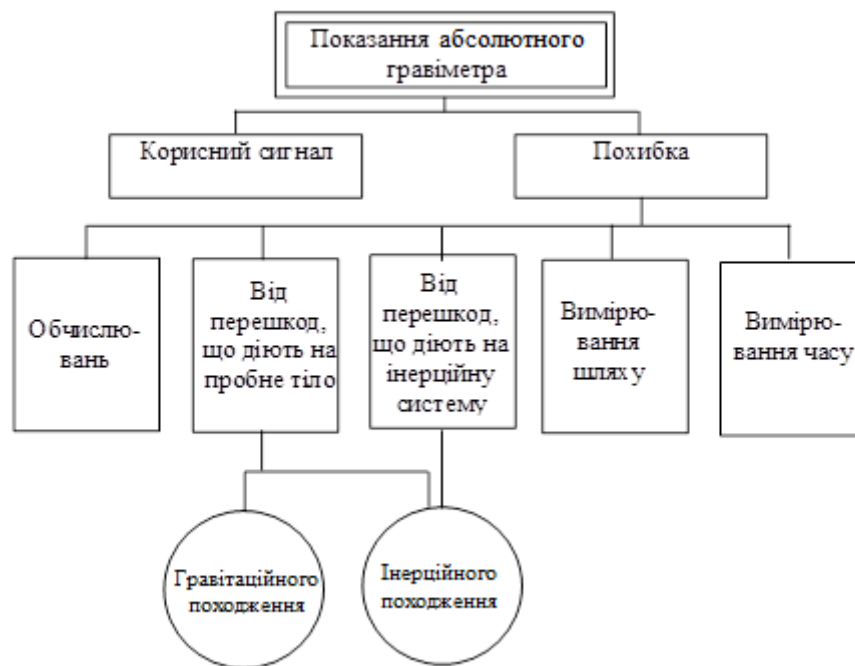


Рис. 1.9 Структура показників абсолютного балістичного гравіметра

### 1.5.2 Види похибок АГ

Похибку вимірювань гравіметрами можна розділити на дві основні складові: випадкову (статистичну) й систематичну (інструментальну) [2].

Випадкова похибка – це похибка, викликана відхиленням (флуктуацією) даних спостереження. Природа даних флуктуацій може визначатися, по-перше, “поведінкою” вимірювальної величини або вимірювального приладу, по-друге, умовами проведення вимірювання, або обома цими факторами. Однак важливо, що взаємодія цих причин і їх зміна в ході експерименту приводить до випадкової зміни результату по величині і знаку. Випадкова похибка обумовлена впливом не скомпенсованої частини вібросейсмічних перешкод, вона зменшується методом накопичення й усереднення результатів повторних вимірювань.

Систематична похибка - це постійна або повільно змінна (“дрейфуюча”) за величиною похибка. Вона обумовлює деякий “зсув”

вимірюваного значення відносно істинного, який не є випадковим, і тому його вплив не може бути усунутий методами статичної обробки результатів вимірювань. Можливі джерела систематичних похибок:

- недосконалість використовуваного методу вимірювання;
- недосконалість використовуваної вимірювальної апаратури;
- погана настройка вимірювальної апаратури;
- непостійність умов експерименту і вплив зміни навколишнього середовища на вимірювальну величину та вимірювальні прилади.

Серед систематичних похибок слід виділити так звані інструментальні похибки. Якщо всі інші систематичні похибки усунуті, то залишаються похибки, які обумовлені класом точності вимірювальних приладів. Величина інструментальної похибки для кожного приладу установлюється в результаті його метрологічної перевірки та калібровки і записується в його паспорті [17].

Метрологічна задача при розробці, виготовленні та дослідженні гравіметрів зводиться до зменшення всіх складових похибки вимірювання. Так, похибки випадкового походження зменшують шляхом збільшення числа вимірювань  $N$  згідно виразу  $\sigma/\sqrt{N}$ , якщо є підстава вважати, що  $g = \text{const}$ .

Похибка вимірювання прискорення, що викликана помилками вимірювання двох інтервалів часу  $T$  та  $T_n$  представляється у вигляді:

$$\Delta g \approx 10^{-9} \cdot g \cdot \sqrt{(\alpha_1^2 \cdot \Delta T^2 + \alpha_2 \cdot \Delta T_n^2)}, \quad (1.27)$$

де  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  – відомі та сталі коефіцієнти;

$\Delta T$  та  $\Delta T_n$  – похибки вимірювання інтервалів часу  $T$  та  $T_n$ .

Якщо, наприклад,  $\Delta T = 5$  нс, а  $\Delta T_n = 10$  нс, то  $\Delta g = 0,25$  мГл. Згідно інших джерел, не виключена частина систематичної похибки гравіметра, обумовлена його чутливістю до розширень інтервалу часу  $T_n$ , складає  $0,6 \div 1$  мкГл. Деякі фізичні явища, що викликають систематичні похибки наведені в таблиці 1.4.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						43
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.4

## Явища, що викликають систематичні похибки

Впливові Фактори	Фізичні явища	Оцінка кількісного впливу, мГл	Невиключний залишок, мГл
Гравітаційні	Притягання Сонця та Місяця	$10^{-1}$	$10^{-2}$
	Притягання апаратури	---	$5 \cdot 10^{-4}$
	Гравітаційний градієнт	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$
	Вплив локальних змін мас атмосфери	$\pm 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$
	Вплив мас ґрунтових вод	$\pm 2 \cdot 10^{-2}$	$10^{-2}$
Інерційні	Електростатичні та магнітні сили	---	$8 \cdot 10^{-3}$
	Градієнт магнітного поля	---	$5 \cdot 10^{-4}$
	Опір залишкового газу	---	$7 \cdot 10^{-3}$
	Вплив обертання Землі	---	$5 \cdot 10^{-4}$
Інструментальні при визначенні шляху	Нестабільність довжини хвилі лазера	$\pm 3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$
	Нестабільність температури	---	$10^{-3}$
	Обертання пробного тіла навколо горизонтальної вісі	---	$4 \cdot 10^{-3}$
	Нестабільність тиску	---	$10^{-3}$
	Відхилення від вертикалі	---	$10^{-3}$
Інструментальні при визначенні часу	Нестабільність генератора	---	$5 \cdot 10^{-4}$
	Неточність вимірювання інтервалів часу	$\pm 5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$
	Кінцева швидкість світла	25	---

Щодо відносного підвищення точності вимірювань, то слід відмітити, що вона залежить від вірності і збіжності результатів. Вірність, обумовлена відносним значенням систематичної похибки  $\varepsilon_{\text{сист.}}$ , і збіжність, що визначається відносним значенням випадкової похибки  $\varepsilon_{\text{вип.}}$ , обумовлюють точність вимірювань  $T$ :

$$T = \frac{1}{\sqrt{(\varepsilon_{\text{сист.}}^2 + \varepsilon_{\text{вип.}}^2)}} \quad (1.28)$$

У відповідності з даним виразом підвищення точності вимірювань здійснюється шляхом врахування максимального числа факторів, що впливають на результат вимірювань, з метою введення поправок на

систематичні впливи чи шляхом виключення цих впливів та зменшення випадкових похибок. При чому, як правило, необхідно, щоб систематичні похибки гравіметричних даних були набагато меншими випадкових. Разом з тим, деякі дослідники успішно використовують рандомізацію систематичних похибок для зменшення їх впливу, широко застосовують ЕОМ для обробки результатів вимірювань в реальному масштабі часу з метою виключення систематичних та зменшення випадкових компонентів похибок вимірювань [7].

### 1.5.3 Джерела похибок при вимірюванні балістичним методом та їх розрахунок

Головними джерелами похибок балістичного методу є гальмування падаючого тіла навколишнім повітрям, взаємодія відбивача з електричними й магнітними полями, мікроколивання фундаменту, обертання тіла, не вертикальність світлового променя. Опір повітря, електричні й магнітні сили приводять до відхилень у русі тіла від закону вільного падіння. Інші впливи проявляються як похибки вимірювання часу й відстані.

Тертя повітря зменшує прискорення пробного тіла. Сила тертя залежить від тиску повітря й від розмірів тіла. Для зменшення тертя камеру, у якій падає пробне тіло, вакуумують. Розрахунки й експериментальні дані показують, що при залишковому тиску  $\sim 10^{-6}$  вплив тертя не перевищує 0,01 мГл.

Опір розрідженого газового середовища пропорційний швидкості падаючого тіла. Отже, при симетричних способах вимірювання вплив сили тертя компенсується й не позначається на результаті, оскільки в симетричних точках траєкторії (станціях) вона однакова по величині, але спрямована в протилежні сторони. В інших випадках тертя враховують поправкою [21].

Електричні й магнітні сили. При наявності тертя повітря і при гальмуванні пробне тіло може електризуватися. Іноді пробна маса містить

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						45
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

феритовий якір (елемент магнітного пускового пристрою в приладах для вимірювань несиметричним способом), що володіє залишковою індукцією.

При взаємодії заряду з навколишніми електричними полями й намагніченого якоря з магнітним полем Землі й з місцевими магнітними полями виникають сили, що впливають на рух тіла. Для захисту від цих впливів пробну масу й внутрішні елементи приладу, які здатні електризуватися, екранують.

Мікроколивання фундаменту (мікросейсми), на якому встановлений гравіметр, викликані вітром, хвилюванням моря, сейсмічною активністю Землі, промисловими установками і транспортом. Періоди мікроколивань різноманітні: від тисячної долі секунди до 10-20 с. Максимальні амплітуди, що досягають 1 мкм, мають низькочастотні коливання.

Мікросейсми передаються всім елементам гравіметра, крім падаючого тіла. При цьому нерухоме (опорне) плече інтерферометра залишається постійним, а змінне плече змінюється із частотою мікросейсм. Різниця переміщень приладу в початковий й кінцевий моменти вимірювань відрізка шляху буде похибкою вимірювання шляху вільно падаючого тіла. Для оцінки можливого впливу мікросейсм обмежимося розрахунком для найпростішого способу вимірювання, при якому справедливе рівняння  $S = gt^2 / 2$ . Нехай за час падіння  $t=0,45$  с ( $S=100$  см) прилад змістився на величину  $\delta S = 1\text{мкм} = 10^{-4}\text{см}$ . Похибку сили тяжіння знайдемо згідно рівняння:

$$\delta g = 2 \cdot \frac{\delta S}{t^2} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{(0,45)^2} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{см} / \text{с}^2 = 1,0 \text{мГл},$$

Прагнучи зменшити вплив мікросейсм, вимірювання виконують багатократно, спостерігають вночі, коли амплітуди мікросейсм мінімальні, інтерферометр розміщують на віброізолюваній основі. Спільне застосування цих мір дозволяє знизити вплив мікросейсм у десятки разів.

Обертання вільно падаючого тіла відносно центра ваги виникає в момент його звільнення через бічний імпульс сили, що створює катапульта або пусковий пристрій гравіметра. Якщо оптичний центр тіла не збігається з

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						46
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

його центром ваги, то обертання приведе до додаткової різниці ходу інтерференційних променів. Іншими словами, шлях, пройдений центром ваги тіла, і виміряний шлях будуть різні.

При ретельному виготовленні пробного тіла домагаються розбіжності (неспівпадання) центрів  $\leq 10^{-4}$ , що дозволяє зменшити похибку до  $10^{-4}$  мГл [21].

Нахил світлового променя. Якщо промінь світла, що падає на пробне тіло, відхилений від вертикалі на кут  $\alpha$ , то інтерференційним методом буде виміряно не пройдену центром тяжіння відстань  $S$ , а завищену величину  $S' = S / \cos \alpha$ . Систематична похибка внаслідок нахилу променя складе:

$$\delta S = \frac{S}{\cos \alpha} - S \sim S(1 + \alpha^2) - S = S \frac{\alpha^2}{2}, \quad (1.29)$$

Згідно (1.8) похибка вимірювання буде становити

$$\delta g = 2 \cdot \frac{\delta S}{t^2} = \frac{2S}{t^2} - \frac{\alpha^2}{2} = g \frac{\alpha^2}{2}, \quad (1.30)$$

При допустимій похибці  $\delta g = 0.001 \text{ мГл}$  ( $\delta g / g = 1 \cdot 10^{-9}$ ) за допомогою останнього рівняння одержимо:

$$\alpha'' = 2 \sqrt{\frac{\delta g}{g}} \cdot \rho'' = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 2,06'' \cdot 10^5 = 9,2'',$$

Як вже зазначалось раніше, похибка лазерного інтерферометра, що є пристроєм для відтворення одиниці довжини, робить суттєвий вплив на похибку гравіметра. Визначимо одну із похибок інтерферометра - дифракційну похибку, що обумовлена обмеженою апертурою світлового пучка:

$$\Delta g / g \approx 0,1 \cdot (\lambda / d)^2. \quad (1.31)$$

При довжині хвилі  $\lambda = 0,633 \text{ мкм}$ , діаметрі пучка  $d \approx 2 \text{ мм}$ :

$$\Delta g / g = 0,1 \cdot (0,633 \cdot 10^{-6} / 2 \cdot 10^{-3})^2 \approx 1,0017225 \cdot 10^{-8}.$$

Для того, щоб результат абсолютних вимірювань можна було використати для наступних робіт, у вимірюване значення  $g$  варто ввести дві поправки.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						47
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

Першою поправкою враховують короткоперіодичні варіації  $g$  внаслідок місячно-сонячного притягання, які називаються приливною зміною прискорення сили тяжіння. Вона може досягати 0,3 мГл і змінюватися зі швидкістю до 1мкГл/хв. Поправка на місячно-сонячне притягання необхідна для того, щоб стали порівнянними (зіставленими) виконані в різний час вимірювання. Однак розрахувати її для якого-небудь пункту можна лише приблизно з точністю 0,01-0,02 мГл. Тому поправку знаходять за допомогою статичного гравіметра, який безупинно реєструє приливні варіації  $g$  у пункті абсолютних вимірювань.

Друга поправка служить для приведення кінцевого результату абсолютних вимірювань до фундаментального пункту, наприклад, до поверхні основи, на якій встановлено прилад. Вона називається поправкою на висоту й дорівнює  $\frac{\partial g}{\partial H} H$ , де  $\frac{\partial g}{\partial H}$  - вертикальний градієнт прискорення сили тяжіння,  $H$  - відстань між основою приладу й точкою, для якої значення  $g$  знайдене зі спостережень [21].

#### 1.5.4 Точність вимірювання часу й шляху

Для розрахунку допустимих похибок реєстрації часу руху тіла й пройденого шляху обмежимося найпростішою формулою (1.8), що приблизно описує рух падаючого тіла. Знайдемо логарифмічну похідну (1.8) по змінним  $g$ ,  $S$ ,  $t$  і перейдемо до середніх квадратичних похибок:

$$\left(\frac{m_g}{g}\right)^2 = \left(\frac{m_S}{S}\right)^2 + \left(\frac{2m_t}{t}\right)^2. \quad (1.32)$$

Нехай пройдений шлях  $S = 100\text{см} = 1\text{м}$ . Вважаючи  $g = 9,8\text{м/с}^2$  ( $980\text{см/с}^2$ ), знайдемо вимірюваний проміжок часу

$$t = \sqrt{\frac{2S}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{9,8}} = 0,45\text{с}.$$

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						48
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		



Задамо допуск похибки сили тяжіння  $m_g = 0.01 \text{ мГл} \left( \frac{m_g}{g} = 1 \cdot 10^{-8} \right)$  й

будемо вважати рівними впливи похибок вимірювання часу й шляху:

$$\frac{m_s}{S} = \frac{2m_t}{t} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{m_g}{g} = 0,71 \cdot 10^{-8}.$$

Визначимо  $m_s$  і  $m_t$ :

$$m_s = 0,71 \cdot 10^{-8} \cdot S = 0,71 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 0,71 \cdot 10^{-2} \text{ мкм} = 7 \text{ нм},$$

$$m_t = 0,36 \cdot 10^{-8} T = 0,16 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 1,6 \text{ нс}.$$

Розглянуті варіанти балістичного методу передбачають вимірювання двох або трьох інтервалів часу й одного або двох відрізків шляху. Отже, вони пред'являють ще більші вимоги до точності вимірювання шляху й часу [21].

Таким чином, при абсолютних визначеннях балістичним методом з похибкою  $10^{-8} \text{ г}$  необхідно вимірювати шлях (десяті долі метра) з похибкою порядку сотої долі довжини хвилі світла ( $\lambda \sim 0,6 \text{ мкм}$ ), а час (десяті долі секунди) - з похибкою  $\sim 1 \text{ нс}$ . Така висока точність стала можлива лише на сучасному рівні розвитку вимірювальної техніки. Вимірювану відстань порівнюють інтерференційним методом з еталоном довжини, час падіння знаходять по числу коливань еталона частоти.

### 1.6 Розрахунок впливів температури та тиску навколишнього середовища на стабільність випромінювання оптичного квантового генератора (ОКГ)

В ОКГ із зовнішніми дзеркалами частина шляху проміння розміщена в атмосфері (проміжки вікно-дзеркало). Показник заломлення повітря змінюється в залежності від атмосферного тиску, температури, вологості, вмісту  $\text{CO}_2$  та інших газів, проте в даному випадку можна враховувати лише перші 2 фактори, які чинять найбільш сильний вплив.

Показник заломлення повітря для  $\lambda = 0,633 \text{ мкм}$ , що приведений до стандартної щільності повітря ( $0^\circ\text{C}$  і  $760 \text{ мм. рт. ст.}$ ):

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						49
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

$$n_{30} = 1,00029.$$

Знаючи, що  $\frac{n_3 - 1}{\rho}$  – величина стала, і що щільність повітря  $\rho$  при зміні тиску

$P$  й температури  $t$  змінюється наступним чином:

$$\rho = \frac{0,001293}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot \frac{H}{760}, [\text{г/см}^3],$$

можна визначити значення показника заломлення:

$$n_3 = 1 + (n_{30} - 1) \cdot \frac{\rho}{\rho_0} = 1 + (1,00029 - 1) \cdot \frac{\rho}{129 \cdot 10^{-5}} = 1 + 0,23 \cdot \rho. \quad (1.33)$$

Межі зміни атмосферного тиску, що спостерігались до теперішнього часу на рівні моря, складають 684,0...808,7 мм. рт. ст. Температурні коливання повітряного стовпа в резонаторі від 0 °С до 50 °С. Відповідно до цього можливі крайні значення показника заломлення повітря:

$$n_{3,\min} = 1 + 0,23 \cdot \frac{0,001293}{1 + 0,00367 \cdot 50} \cdot \frac{684}{760} = 1,000225;$$

$$n_{3,\max} = 1 + 0,23 \cdot \frac{0,001293}{1 + 0,00367 \cdot 50} \cdot \frac{808,7}{760} = 1,000315.$$

Граничні коливання  $n_3$  викликають зміни оптичної довжини:

$$\Delta L_3 = (n_{3,\max} - n_{3,\min}) \cdot 2 \cdot L_3 \quad (1.34)$$

де  $L_3 \approx 15$  мм – середня довжина повітряного проміжку (в нашому випадку) вікно-дзеркало.

$$\Delta L_3 = (1,000315 - 1,000225) \cdot 2 \cdot 15 = 27 \cdot 10^{-4} \text{ мм.}$$

Таким чином, коливання тиску та температури повітря можуть викликати зміщення частоти випромінювання ОКГ з зовнішніми дзеркалами на величину:

$$\Delta \nu_3 = \nu \cdot \frac{\Delta L_3}{L_3} = 5 \cdot 10^8 \cdot \frac{27 \cdot 10^{-4}}{15} = 9,0 \cdot 10^4 \text{ МГц.}$$

Тобто в даному випадку відносна стабільність частоти виявляється не краща ніж

$$S_3^{-1} = \frac{\Delta \nu_3}{\nu} = \frac{9,0 \cdot 10^4}{5 \cdot 10^8} = 1,8 \cdot 10^{-4}.$$

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						50
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

## 1.7 Розрахунок впливу зміни температури балону газорозрядної трубки

Більшість лазерів мають конструкцію, схема якої представлена на рис.1.11. Обидва вихідних вікна 2 розрядної трубки 1 розташовані під кутом Брюстера (кут  $\alpha$ ), при якому промінь лазера, поляризований у площині рисунку, не відчуває втрат на відбиття від вікна.

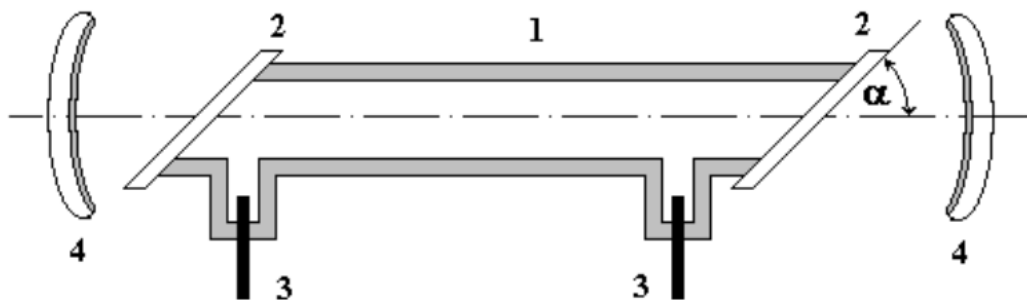


Рис.1.11 Схема конструкції газового лазера

1 – газорозрядна трубка; 2 – бріюстерські вікна; 3 – електроди; 4 – дзеркала резонатора.

Типовим представником газових лазерів на нейтральних атомах є гелій-неоновий ( He - Ne ) лазер. У цьому лазері активними частками є атоми неону, між рівнями якого здійснюється інверсія, а атоми гелію служать для створення ефективного накачування верхнього лазерного рівня атомів неону. Цей лазер одержав широке поширення в техніці й лабораторній практиці.

В ОКГ з зовнішніми дзеркалами оптична довжина змінюється також в зв'язку з коливаннями температури балону газорозрядної трубки, оскільки при зміні довжини балону змінюється відношення відрізків шляху проміння в плазмі та в пасивних ділянках резонатору (в повітрі). Для He-Ne лазерів (так як в нашому випадку саме такий лазер) ці коливання знаходяться в межах 50...150 °С. Балон зі скла К8 розширюється в цьому діапазоні, практично в лінійній залежності від температури. Коефіцієнт термічного розширення, згідно довідникових даних, в середньому  $\alpha_n = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ . Оптична довжина резонатору при максимальному перепаді температур змінюється на

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						51
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

величину:

$$\Delta L_n = L_1 \cdot \alpha_n \cdot (t_1 - t_2) \cdot (n_{z\max} - n_{z\min}), \quad (1.35)$$

де  $L_1$  - довжина газорозрядної трубки, середнє значення якої  $L_1 \approx 160$  мм.

$$\Delta L_n = 160 \cdot 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot [1,000315 - (1 + 6,4 \cdot 10^{-12})] \approx 22,7 \cdot 10^{-6} \text{ мм.}$$

Це викликає зміщення частоти на  $\Delta \nu_n = 70$  МГц, що відповідає відносній стабільності:

$$S_n^{-1} = \frac{\nu_n}{\nu} = \frac{70}{5 \cdot 10^8} = 1,4 \cdot 10^{-7}.$$

При роботі трубки у встановленому режимі, коли коливання температури не виходять за межі  $\pm 5$  °С, стабільність покращується до  $1 \cdot 10^{-8}$ .

Необхідно враховувати, що в даному випадку при підвищенні температури зміщення частоти відбувається в протилежному напрямку, порівняно зі зміщенням за рахунок нагріву вихідних вікон та корпусу резонатора.

## 1.8 Основні недоліки існуючих балістичних гравіметрів

Точність визначення абсолютних значень сили тяжіння сучасними балістичними гравіметрами повинна становити перші одиниці мкГл. Основним джерелом похибок прийнято вважати механічні коливання основи, на якій встановлений інтерферометр гравіметра, причому немаловажна роль приділяється перешкодам на частотах нижче 5 Гц, у той час як коливання в діапазоні 10-90 Гц досить добре придушуються референтним сейсмометром. Показано, що низькочастотні сейсмічні коливання не є домінуючим джерелом похибки визначення  $g$  і подальші зусилля варто зосередити на пошуку інших причин похибок [24].

Для проведення абсолютних вимірювань сили тяжіння потрібна велика кількість складного допоміжного устаткування, включаючи криогенне забезпечення, що затрудняє використання зазначених гравіметрів у польових умовах. До недоліків балістичних гравіметрів можна додати й тривалість

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						52
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

одного вимірювання притому, що виявлені мікрофлуктуації гравітаційного потенціалу з періодом менше хвилини, можуть привести до неоднозначності й невизначеності результатів.

Головним недоліком балістичних гравіметрів є їх висока чутливість до великої кількості впливових факторів, що в свою чергу тягне за собою конструктивну складність, великі габаритні розміри та вагу гравіметрів, а також їх периферійних приладів, складність обробки результатів, невисоку продуктивність, довготривалість вимірювань тощо [5].

Альтернативні принципи вимірювання ПСВ дозволяють частково усунути ці недоліки, але не в змозі забезпечити потрібну, на даний час, точність та надійність вимірювань. Сучасний балістичний гравіметр для абсолютного визначення ПСВ представляє собою високоорганізовану вимірювально-інформаційну систему, що містить мікро-ЕОМ, яка може виконувати управління, контроль, діагностику, документаційні та обчислювальні процедури для одержання оцінок ПСВ.

## Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз методів визначення прискорення сили ваги, розглянуто перспективність розвитку, різновиди схем абсолютний гравіметрів (АГ). Обґрунтовано доцільність в подальшому в дисертаційній роботі досліджувати роботу абсолютного гравіметра, як одного із найбільш досконалих.
2. Виявлено основні переваги АГ: більші точність та швидкодія.
3. Наведено основні характеристики сучасних балістичних стаціонарних та транспортних гравіметрів.
4. Проаналізовано роботу основного елементу АГ – лазерного інтерферометра зі стабілізацією положення інтерферуючих променів.
5. Зроблено опис конструкції АГ та описано принцип його дії.

6. Розроблено математичну модель АГ.

7. Наведено склад та структуру основних похибок АГ. Проведено розрахунки і оцінку основних похибок АГ.

8. Точність абсолютних вимірювань балістичним методом на сьогоднішній день надзвичайно висока - порядку одного мікрогала (0.001 мГл) при часі одного вимірювання близько 10 с. Для підвищення точності виконуються багаторазові вимірювання, які потім статично обробляються.

9. При вимірюваннях балістичним методом вплив зовнішнього середовища й інструментальних похибок можна усунути або врахувати малими поправками з точністю  $\sim 0,01 \text{ мГл}$  ( $10^{-8} \text{ g}$ ). Тому реальна точність абсолютних вимірювань може скласти декілька одиниць  $10^{-8} \text{ g}$ , а при достатньо точному еталоні довжини може наблизитися до  $1 \text{ мкГл}$  ( $10^{-9} \text{ g}$ ).

					<i>МД ПІ7114 ПЗ</i>	Арк
Змн.	Арк	№ доквм.	Підпис	Дата		54

## РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Умови проведення експериментальних досліджень

Розроблено технічні умови для вимірювання абсолютного значення прискорення сили тяжіння на пунктах фундаментальної астрономо-геодезичної мережі (ФАГМ). При виконанні вимірювань на пункті координати, визначені супутниковими методами, передаються на постамент (гравіметричний пункт ФАГМ), де встановлюється балістичний гравіметр. На кожному пункті виконується вимірювання вертикального градієнта сили тяжіння з похибкою не більше 3 мкГл. При цьому повинні виконуватися наступні вимоги [11]:

- застосовуваний абсолютний балістичний гравіметр повинен мати практично необмежений набір технічних методів;
- нестабільність довжини хвилі випромінювання робочого лазера за час спостережень не повинна перевищувати  $5 \cdot 10^{-9}$ ;
- відносна похибка стандарту частоти повинна бути не більше  $5 \cdot 10^{-10}$ ;
- тиск залишкового газу в балістичній камері не повинен перевищувати  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.

Відповідно до діючої інструкції при високоточних визначеннях прискорення сили тяжіння повинні виконуватися наступні умови [10,11]:

1. Пункт розміщується в капітальному будинку в підвалі (напівпідвалі) або на першому поверсі.

2. Прилади встановлюються на постаменті розміром верхньої площини 100 см, що піднімається над підлогою на 10-50 см і заглибленому в ґрунт на глибину не менш 150 см. Типи постаментів встановлюються залежно від фізико-географічних умов району, глибини промерзання й відтавання ґрунтів, гідрогеологічного режиму й інших особливостей місцевості.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						55
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

3. У центрі постаменту закладається нівелірна марка з номером, до якої відноситься вимірне значення прискорення сили тяжіння. На цю марку передається висота з нівелювання 1 класу.

4. Приміщення, у якому знаходиться пункт, повинне мати площу не менше 8 кв. метрів; висота стелі над верхньою гранню постаменту повинна бути не менше 2 м.

5. Температура в приміщенні повинна бути в межах  $+10-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

6. Приміщення повинне мати підводку змінного електричного струму напругою  $220\pm 10\text{ }\text{В}$ , потужністю не менше 2 кВт.

7. Для роботи вакуумного насоса необхідний трифазний електричний струм потужністю 250 Вт.

8. Для охолодження вакуумного насоса в кімнаті повинен бути водопровід з температурою води не вище  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и з витратою 50 літрів на годину.

9. Пункт повинен бути вилучений від джерел вібрацій, потужних електричних і магнітних полів, не більше: від берега моря - 1 км; від залізниць - 0,8 км; від великих промислових підприємств - 0,5 км; від шосейних доріг і вулиць із інтенсивним рухом транспорту - 0,2 км.

10. Повинна бути забезпечена можливість цілодобової роботи на пункті.

## 2.2 Експериментальні дослідження абсолютних гравіметрів

Розвиток абсолютних методів вимірювання прискорення вільного падіння поставило в цей час на порядок денний питання про створення масового, дешевого, надійного і простого в експлуатації абсолютного балістичного гравіметра. Розробка й впровадження таких приладів дозволить вирішувати не тільки завдання метрологічного забезпечення гравіметрії (створення зразкових і еталонних засобів вимірювань), але й більш гнучко й

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						56
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		



економно забезпечити виконання масових гравіметричних вимірювань для геодезії, геофізики, геології тощо.

У числі складних організаційно-технічних і наукових завдань, що стоять перед виробниками, вирішальну роль грає коректний аналіз похибок - випадкових і систематичних, а також врахування впливу умов експлуатації на точність гравіметрів.

У даному розділі розглянуті результати експериментів [5], які дозволяють оцінити основні джерела випадкових і систематичних похибок, а також виробити певні рекомендації для забезпечення високої експлуатаційної надійності балістичних гравіметрів. При цьому аналіз спрямований на виявлення джерел похибок, які перешкоджають одержанню вимірювань з похибкою порядку одиниць мкГл.

До таких похибок варто віднести:

- вплив збуджуючих дій інерціального характеру (у тому числі динамічні дії власне самого гравіметра на результати вимірювань);
- вплив залишкового газу в камері балістичного гравіметра;
- вплив аномальних градієнтів гравітаційного поля, обумовлених оточуючими балістичний гравіметр масами, що тяжіють (фундамент, стіни приміщення та інше.).

Як показано в [22], вплив близько розташованих мас, що тяжіють, не тільки вносить помітні (до десятків мкГл) похибки в результати вимірювань, але й може істотно ускладнити взаємну редукцію показань приладів при їхньому безпосереднім звіренні (зіставленні, порівнянні). При цьому похибка звірення може в кілька разів перевищувати оцінку невиключних залишків систематичних похибок. Новий науковий напрямок - камерна гравіметрія - дозволяє реалізувати більше точне врахування аномальних градієнтів [23].

Уточнення невиключних залишків систематичних похибок, обумовлених наведеними вище причинами, вимагає експериментальної перевірки, тому що математичні моделі не можуть повною мірою

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						57
Змн.	Арк	№ док-м.	Підпис	Дата		

відобразити складність фізичних процесів, що протікають у балістичних гравіметрах [6].

Синтез математичної моделі (а, значить, і відповідного алгоритму вимірювань), що дозволяє повною мірою врахувати вплив залишкового газу у вакуумній камері балістичного гравіметра, не може бути виконаний із-за невизначеності і велика кількість технічних параметрів, що підлягають врахуванню: тиск газу, геометрія пробного тіла й вакуумної камери, градієнти тиску, обумовлені рухом пробного тіла й неоднорідністю температури по висоті вакуумної камери із-за наявності локальних внутрішніх і зовнішніх джерел тепла.

Зовнішні сейсмічні умови, а також імпульсна динамічна дія (вплив) при звільненні (або підкиданні для симетричних методів) пробного тіла суттєво впливають на величину невиключного залишку систематичної похибки. Якщо зовнішні сейсмічні впливи у певній мірі носять випадковий характер і при певному об'ємі вибірки їх вплив можна звести до мінімуму, то робота катапульти або механізму звільнення пробного тіла збуджує в елементах конструкції приладу (у тому числі чутливому елементі - інтерферометрі лазерному) і фундаменті загасаючі механічні коливання й аперіодичні інерціальні прискорення, синхронні з моментом вимірювання. Конструкційні методи боротьби із цим явищем (розміщення інтерферометра й балістичного блоку гравіметра на роздільних віброізованих фундаментах) найчастіше неприйнятні. Наявність синхронної перешкоди, у якій явно виражена детермінована основа, що повторюється від вимірювання до вимірювання, приводить до появи систематичної похибки, величина якої залежить від способу установки гравіметра на фундаменті (грунті), власних частот конструкції гравіметра, частотних характеристик гравіметра як інтегруючої ланки та інше. Вклад внутрішньої сейсмики на покази гравіметра можна врахувати шляхом відновлення вхідного впливу по вихідним значенням, однак, у загальному випадку ця задача є некоректною і її рішення можливо не для будь-яких сейсмічних сигналів.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						58
Змн.	Арк	№ док-м.	Підпис	Дата		

Щоб виключити систематичну похибку, необхідна розробка таких алгоритмів вимірювань, які або дозволяють вводити поправки за дії зовнішніх збурень (мається на увазі адекватні в розумінні частотних характеристик датчики сейсмічних збурень), або рандомізація перешкоди.

Для визначення впливу залишкового газу у вакуумній камері балістичного гравіметра на показання приладу зроблені експерименти. У гравіметрі з несиметричним рухом вклад градієнтів тиску разом з основним ефектом від опору залишкового газу досліджений при варіації ступеня вакууму. Отриману залежність показів гравіметра від тиску апроксимували прямою і екстраполювали до нульового тиску. Таким чином, врахування внеску неоднорідності температури сполучали з врахуванням внеску від основного ефекту. При цьому було потрібно дотримання температурного режиму калібрування протягом всього процесу вимірювання, а також виключення можливості роботи в несталому режимі.

У гравіметрі із симетричним рухом пробного тіла градієнтна похибка змінюється з тиском немонотонно. При достатньо високому вакуумі час встановлення градієнта тиску більше тривалості польоту тіла, і на висхідній гілці траєкторії тіло рухається в неоднорідному середовищі, порушуючи цю неоднорідність. Тому низхідна гілка припадає на однорідне середовище. Таким чином, має місце симетричний рух в "несиметричному" середовищі, і похибка вимірювання висока. При низькому розрядженні (тиск порядку 133, 322 Па) час встановлення градієнта тиску менше часу польоту, і середовище стає "симетричним". У цьому випадку градієнтний зсув показів пропорційний основному ефекту так само, як і при несиметричному способі.

Екстраполяція залежності до нульового тиску, звичайно, не може бути застосованою, і усунення похибки виконується шляхом введення поправок при фіксованому температурному градієнті. Якщо зовнішні джерела тепла більш потужні, ніж внутрішні, то ефективними методами усунення градієнта є підвищення теплопровідності корпусу балістичного блоку й збільшення його внутрішнього діаметра.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						59
Змн.	Арк	№докум.	Підпис	Дата		

Залежність показань від температури в перехідному режимі вивчали на гравіметрах із симетричним методом вимірювання. Для виявлення цієї залежності корпус вакуумної камери локально нагрівали потоком повітря (з температурою біля поверхні камери  $60^{\circ}\text{C}$ ) або електрообігрівачами. Вимірювання проводили під час нагрівання й у процесі остигання камери. Аналіз результатів експериментів показує, що залежність від температури корпусу в найбільш нагрітому місці має крутизну від  $0,02$  до  $0,2$  мГл/ $^{\circ}\text{C}$  і істотно залежить від тиску усередині вакуумної камери (рис.2.1).

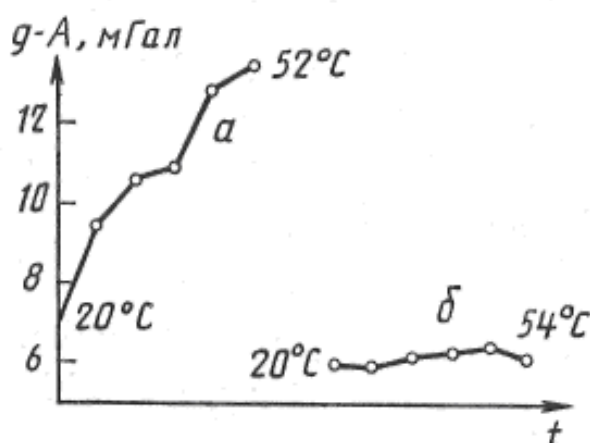


Рис.2.1 Залежність показів вимірювань від температури та тиску

а - тиск  $(1,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 133,32$  Па; б -  $(0,7 \cdot 10^{-3}) \cdot 133,32$  Па

У сталому температурному режимі залежність від температури практично відсутня, але має місце залежність показань від тиску. Все це підтверджує правильність гіпотези про те, що відповідальними за вплив температури на показання гравіметра є градієнти температур у перехідному режимі й пов'язані з ними газодинамічні процеси.

Для з'ясування механізму й ступеня впливу власних сейсмічних впливів балістичного блоку гравіметра вимірювання проводили при варіюванні висоти польоту пробного тіла, що контролювалася по напрузі живлення на електромагніті катапульти. Така методика дозволяє змінювати фазу й амплітуду "синхронного" впливу катапульти. При дослідженнях реєстрували і покази гравіметра, і зсув інтерферометра лазерного під час вимірювань.

Блок балістичний і інтерферометр гравіметра або являли собою єдиний конструктив, або кріпилися роздільно (для вимірювання відносних зсувів інтерферометра лазерного й блоку балістичного). При цьому досліджували наступні варіанти установки: кутовий відбивач кріпили безпосередньо на фундаменті й визначали його переміщення під час роботи балістичного блоку, встановленого в безпосередній близькості від відбивача; ті ж операції виконували при установці відбивача на розв'язаній (несумісній) від фундаменту опорі при працюючому й непрацюючому балістичному блоці.

Обробка результатів полягала у придушенні випадкової й виділенні періодичної й аперіодичної компонент шляхом цифрової фільтрації результатів вимірювань. Оцінка результатів показала:

- наявність загасаючих коливань пояснюється резонансними характеристиками фундаментів, власні частоти яких становили 30-80 Гц;
- аперіодична компонента зсувів фундаментів може бути інтерпретована як довгоперіодична, так як обмежений діапазон висоти польоту пробного тіла не дозволяє виявити ці періоди повністю;
- вклад внутрішньої сейсміки істотно залежить від способу установки й кріплення балістичного блоку на фундаменті й у гравіметрі (жорстке кріплення гравіметра до фундаменту анкерними болтами дозволяє мінімізувати цей вклад);
- жорстка конструкція інтерферометра забезпечує відсутність власних коливань останнього;
- фільтрація коливань фундаменту за допомогою механічних розв'язаних пристроїв (пружин, подушок тощо) може привести до появи аперіодичних зсувів інтерферометра, що важко враховуються;
- під впливом роботи катапульти балістичного блоку досліджуваний фундамент зміщався на величину близько 5 мкм із періодом 25 мс; переміщення інтерферометра відносно фундаменту становило 1 мкм.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						61
Змн.	Арк	№ док-м.	Підпис	Дата		

Істотно зменшити вклад коливань фундаменту на результати вимірювань можна за рахунок усереднення показів гравіметра при різних висоті польоту пробного тіла в силу періодичного характеру цієї залежності (рис. 2.2, де а - експериментальна крива; б - її апроксимація поліномом Чебишева 6-го ступеня).

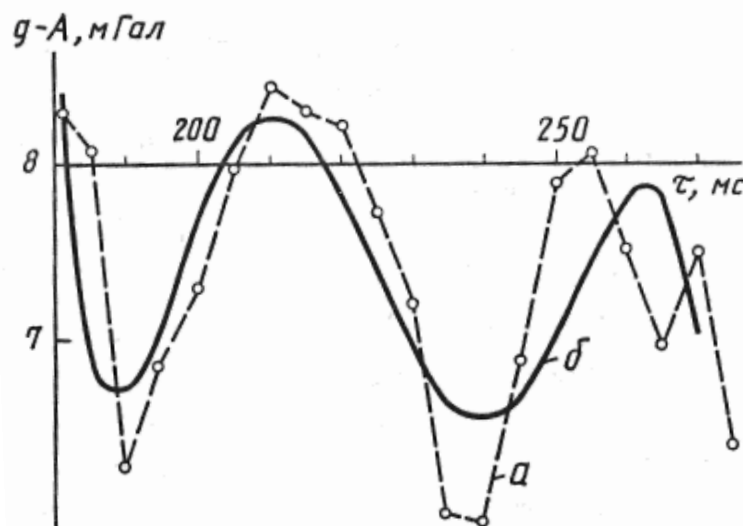


Рис. 2.2 Залежність показів вимірювання від коливань фундаменту

В експерименті отримано зниження цього внеску на порядок. Для з'ясування характеру розподілу джерел випадкових похибок досліджена робота двох синхронно працюючих гравіметрів. При цьому реєстрували різницю показань приладів. Параметри й умови роботи одного з них підтримували постійними, а на другий прилад накладали контрольовані впливи. Експериментальні залежності порівнювали з розрахунковими, що дозволило оцінити правильність вибору математичних моделей процесів.

При аналізі зіставляли два незалежно працюючі прилади, два синхронізованих прилади, що працюють із одним балістичним блоком, і два прилади, що працюють із загальним балістичним блоком і інтерферометром. Два незалежно працюючі прилади показали відсутність зв'язку показань (коефіцієнт кореляції  $\sim 0,1$ ). В інших випадках коефіцієнти кореляції становили 0,2; 0,7 - 0,9 і 0,98 - 0,99. Отримані результати підтверджують гіпотезу про переважаючий вклад на випадкову похибку зовнішніх (в

основному сейсмічних) перешкод. Описана методика синхронних спостережень дала можливість оцінити похибки вузлів гравіметра (інтерферометрів, електронних і балістичних блоків) у різних режимах при незалежності результатів досліджень від сейсмічних умов у пункті спостережень.

Розроблювальні балістичні гравіметри дозволяють накопичувати великі масиви одиничних відліків за короткий час. Застосування машинних методів обробки цих масивів, заснованих на сучасних методах цифрової фільтрації, спектрального аналізу й математичного моделювання забезпечує багаторазове зниження похибок вимірювання [16]. Балістичні гравіметри в комплексі з першими перетворювачами для вимірювання зовнішніх впливів (прискорень, температури, тиску) для введення відповідних поправок дозволять ще більше знизити похибки вимірювань.

Отже, зменшення впливу залишкового газу усередині вакуумної камери балістичного гравіметра можна реалізувати на основі експериментального дослідження гравіметра при варіюванні ступеня вакууму. Залежність показів гравіметра від тиску для несиметричних методів і для симетричних за відсутності градієнтів температури будучи лінійною може бути екстрапольована до нульового тиску.

При виконанні високоточних гравіметричних спостережень необхідно враховувати вплив градієнтів температури в балістичному блоці, тому що вони можуть вносити істотні систематичні похибки в результати вимірювань. Звідси випливають відомі обмеження на умови роботи й конструкцію апаратури.

Істотний вклад у похибку вимірювань вносять власні сейсмічні перешкоди при роботі балістичного блоку. Для врахування цього впливу необхідні методичні (вимірювання з варіюванням висоти польоту пробного тіла) і конструкційні (жорсткість конструкції й кріплення гравіметра на фундаменті) заходи.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						63
Змн.	Арк	№ доквм.	Підпис	Дата		

## 2.3 Моделювання впливу параметрів збурень на роботу АГ

У розділі 1 розроблено математичну модель БГ, викладено теорію і принципи побудови БГ, показано їхні переваги над відомими гравіметрами.

Метою даного розділу є вирішення проблеми дослідження впливу параметрів збурюючої дії і деяких власних параметрів БГ на роботу за допомогою ЕОМ.

Задачі розділу:

- 1) перетворити диференціальні рівняння руху БГ зі змінними коефіцієнтами на рівняння “ машинного ” вигляду;
- 2) розробити алгоритм розв’язання диференціального рівняння руху БГ за допомогою ЕОМ;
- 3) дослідити за допомогою ЕОМ вплив частот  $\omega$  і амплітуд  $w_a, w_b$ , збурюючих дій для найнесприятливіших резонансних випадків:  $\omega = \omega_0$ ,  $\omega = 2\omega_0$ ,  $\omega = 3\omega_0$ ,  $2\omega = \omega_0$ ,  $3\omega = \omega_0$ , де  $\omega_0$  - частота власних коливань БГ;
- 4) дослідити вплив на роботу приладу деяких параметрів БГ (відносно коефіцієнта демпфірування  $\xi$ , передатного коефіцієнта  $k_2$  каналу вимірювання).



### 2.3.1 Перетворення вигляду рівнянь руху АГ для моделювання на ЕОМ

Скористаємося рівнянням руху АГ, записавши його у вигляді:

$$\ddot{\alpha} + \dot{\alpha}[2n - L \sin(\omega t + \varepsilon)] + \omega_0^2 \alpha = N \sin \omega t, \quad (2.1)$$

де  $L = \frac{c'_1}{H^2} m l w_b$ ,  $N = \frac{m l k_1}{H^2} w_a$ , - параметри вібрації.

Вважаємо, що  $M(t) = 2n - L \sin(\omega t + \varepsilon)$ ,  $D(t) = \omega_0^2$ , тоді

$$\ddot{\alpha} + \dot{\alpha} \cdot M(t) + D(t) \cdot \alpha = 0, \quad (2.2)$$

де  $M(t)$  і  $D(t)$  - Т-періодичні функції, причому  $\dot{M}(t)$  і  $\dot{D}(t)$  припускають інтегрованими кусково-неперервними.

Рівняння вигляду (2.2) без зміни характеристичних показників можна звести до аналогічного, де  $M(t) = \text{const}$ .

Нехай

$$\int_0^t M(t_1) dt_1 = \aleph t + M_1(t),$$

$$\text{де } \aleph = 2n; M(t_1) = \int_0^t [M(t_1) - \aleph] dt = \frac{L}{\omega} \cos(\omega t + \varepsilon),$$

причому функція  $M_1(t)$  є Т-періодичною.

Замінюючи

$$\alpha = e^{-\frac{1}{2} M_1(t)} \quad x = e^{-\frac{1}{2} \frac{L}{\omega} \cos(\omega t + \varepsilon)} x, \quad (2.3)$$

дістанемо

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + F(t)x = 0, \quad (2.4)$$

в якому

$$F(t) = D(t) - \frac{1}{4} M^2(t) - \frac{1}{2} \dot{M}(t) + \frac{1}{4} \aleph^2 = \omega_0^2 + \nu_0 \sin(\omega t + \varepsilon + \sigma_8), \quad (2.5)$$

де

$$\sigma_8 = \arctg \frac{\omega}{2n}, \quad \nu_0 = \frac{L \sqrt{\omega^2 + 4n^2}}{2}.$$

Вираз (2.4) з урахуванням (2.1) і (2.5) можна записати у вигляді

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + [\omega_0^2 + \nu_0 \sin(\omega t + \varepsilon + \sigma_8)]x = N \sin \omega t \quad (2.6)$$

або, з урахуванням параметрів реальних АБЛГ:  $N = 2 \cdot 10^{-3}$  кГмс,  $k_1 = 5 \cdot 10^{-3}$  кГ м,  $ml = 10^{-3}$  кГ с<sup>2</sup>,  $c'_1 = 5 \cdot 10^{-5}$  кГ·м·с,  $\varepsilon + \sigma_8 = 0$ ,

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + (\omega_0^2 + \nu_1 w_b \sin \omega t)x = 0,625w_a \sin \omega t, \quad (2.7)$$

де  $\nu_1 = \frac{\nu_0}{w_b}$ .

Отже, рівняння руху АБЛГ (2.1) перетворено на одне рівняння (2.7), зручне для моделювання на ЕОМ. Добуте рівняння є рівнянням типу Мат'є-Хілла.

### 2.3.2 Алгоритм розв'язання на ЕОМ диференційного рівняння руху АГ

Дослідження роботи АГ в різних динамічних режимах здійснювали на ЦОМ. Математичну модель АГ описує параметричне рівняння вигляду:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + (\omega_0^2 + \nu_1 w_b \sin \omega t)x = 0,625w_a \sin \omega t \quad (2.8)$$

Запишемо рівняння (5.8) у вигляді, зручному для обчислення:

$$\dot{x} = \dot{Y}; \quad (2.9)$$

$$\dot{Y} = 0,625w_a \sin \omega t - 2\xi\omega_0\dot{x} - (\omega_0^2 + \nu_1 w_b \sin \omega t)x.$$

Задамо початкові умови:

$$x \oslash = 10^{-5}, Y \oslash = 10^{-4}. \quad (2.10)$$

Визначимо константи:  $P = 2$ ,  $w\oslash = 2.5$ ,  $ww = 6.25$ ,  $R = 0.625$ . Уведемо машинні змінні:  $z = \xi$ ,  $Q = \nu_1$ ,  $w = \omega$ ,  $wA = w_a$ ,  $wB = w_b$ , час спостереження  $T = x(t)$ , межа інтегрування  $TMAX = T_{\max}$ , крок інтегрування  $H = \Delta t$ , змінний аргумент  $T = t$ , змінні  $AA = wA * R$ ,  $BB = wB * Q$ ,  $CC = P * w\oslash * Z$ , де  $*$  - знак множення. Тоді вирази (2.9) можна записати у вигляді

$$\dot{X} = Y; \quad (2.11)$$

$$\dot{Y} = \sin(w * T) * (AA - BB * X) - CC * Y - ww * X.$$

Для інтегрування системи диференціальних рівнянь (2.11) застосуємо метод Рунге-Кутта четвертого порядку. Дістанемо розв'язки системи (2.11):

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		66

$$X(T+H) = X(T) + \frac{1}{6} * [X1 + X4 + 2 * (X2 + X3)]; \quad (2.12)$$

$$Y(T+H) = Y(T) + \frac{1}{6} * [Y1 + Y2 + 2 * (Y3 + Y4)],$$

де коефіцієнти  $X1, X2, X3, X4, Y1, Y2, Y3, Y4$  можна визначити таким чином:

$$X1 = H * Y; \quad Y1 = H * [\sin(w * T) * (AA - BB * x) - CC * Y - ww * x]; \quad X2 = H * (Y - 0,5 * Y1);$$

$$Y2 = H * \left\{ \begin{aligned} &\sin[w * (T + 0,5 * H)] * [AA - BB * (X + 0,5 * X1)] - CC * [Y + 0,5 * Y1] - \\ &- ww * (X + 0,5 * X1) \end{aligned} \right\};$$

$$X3 = H * (Y + 0,5 * Y2); \quad (2.13)$$

$$Y3 = H * \left\{ \begin{aligned} &\sin[w * (T + 0,5 * H)] * [AA - BB * (X + 0,5 * X2)] - CC * (Y + 0,5 * Y2) - \\ &- ww * (X + 0,5 * X2) \end{aligned} \right\};$$

$$X4 = H * (Y + Y3);$$

$$Y4 = H * \left\{ \sin[w * (T + H)] * [AA - BB * (X + X3)] - CC * (Y + Y3) - ww * (X + X3) \right\}.$$

Моделювання системи (2.12) диференціальних рівнянь здійснювали за схемою, наведеною в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Основні співвідношення параметрів збурень і власних параметрів АГ

$\omega, \text{с}^{-1}$	$v_1 \cdot 10^{-3}, \text{рад}$															$T_{\max}, \text{с}$	$H, \text{с}$
	$w_a,$ м/с <sup>2</sup>	$w_b,$ м/с <sup>2</sup>	$\xi$	$w_a,$ м/с <sup>2</sup>	$w_b,$ м/с <sup>2</sup>	$\xi$	$w_a,$ м/с <sup>2</sup>	$w_b,$ м/с <sup>2</sup>	$\xi$	$w_a,$ м/с <sup>2</sup>	$w_b,$ м/с <sup>2</sup>	$\xi$	$w_a,$ м/с <sup>2</sup>	$w_b,$ м/с <sup>2</sup>	$\xi$		
	3	3	0,15	10	3	0,45	3	10	0,75	15	3	1	3	15	2		
2,5	8,00			9,60			14,00			17,40			32,40			11,25	0,225
5	15,80			16,60			19,00			22,10			34,00			6,30	0,126
7,5	4,53			8,05			12,30			16,00			31,30			4,20	0,084
1,25	4,53			8,05			12,30			16,00			31,30			25,00	0,200
0,83	3,49			7,85			12,00			15,84			31,30			37,88	0,758

З виразу (2.3) видно, що при  $\omega \rightarrow \infty, \alpha \rightarrow x$ , при  $\omega \rightarrow 0, \alpha \rightarrow 0$ . Для вказаних раніше значень  $w_b = 1 \text{ м/с}^2$  і  $\omega = \omega_0 = 2,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega = 2\omega_0 = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega = 3\omega_0 = 7,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $2\omega = \omega_0 = 1,25 \text{ с}^{-1}$ ,  $3\omega = \omega_0 = 0,83 \text{ с}^{-1}$  змінні  $\alpha$  і  $x$  пов'язані відповідними співвідношеннями:

$$\alpha = e^{-1,25} x, \quad \alpha = e^{-0,625} x, \quad \alpha = e^{-0,43} x, \quad \alpha = e^{-2,5} x, \quad \alpha = e^{-3,75} x.$$

### 2.3.3 Аналіз результатів цифрового моделювання рівнянь руху АГ

1. Проаналізуємо найнесприятливіший щодо можливості виникнення резонансу випадок  $\omega = \omega_0 = 2,5 \text{ с}^{-1}$ . Моделюванням параметричного рівняння (2.8) АГ на ЕОМ добуто графіки функціональної залежності  $x = f(t)$  для випадку, коли основа, розглядуваного АГ, підпадає під дію збурюючих впливів, для яких  $w_a = w_b = 1 \text{ м/с}^2$  відповідно по осях  $0z$  і  $0y$ . Послідовно було задано значення відносного коефіцієнта затухання  $\xi$ : 0,15; 0,45; 0,75; 1. Експериментально визначено, що при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  можливий резонанс. Зі зростанням демпфірування, наприклад  $\xi = 0,45 \dots 1$ , резонансу немає. Крім того, в разі збільшення демпфірування зменшується амплітуда усталених вимушених коливань (табл. 2.2, в якій наведено результати цифрового моделювання).

2. Аналіз добутих залежностей  $x = f(t)$  для  $w_a = w_b = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $\xi = 0,15$ ; 0,45; 0,75; 1 показав, що у цьому разі амплітудні значення усталених вимушених коливань АГ у три рази більші, ніж у попередньому випадку для відповідних  $\xi$ .

Резонанс можливий при малому демпфіруванні, наприклад, при  $\xi = 0,15$ , як і в попередньому випадку. Зі зростанням демпфірування амплітуда усталених вимушених коливань АГ зменшується (табл. 2.2).

3. Визначено залежності  $x = f(t)$ , коли амплітудне збурення по осі  $0z$   $w_a = 3 \text{ м/с}^2$ , а по осі  $0y$  в 3,33 рази більше, ніж у попередньому випадку  $w_b = 10 \text{ м/с}^2$ . Такі амплітудні значення усталених вимушених коливань незначно відрізняються від попередніх відповідних коливань  $x = f(t)$ . Це підтверджує висновок, зроблений унаслідок аналізу статичних похибок АГ про те, що на його роботу не впливають горизонтальні прискорення. Характер впливу демпфірування такий самий, як і в попередніх випадках (табл. 2.2).

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						68
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2

Амплітуди вимушених коливань АГ (результати цифрового моделювання)

№ п/п	$\omega$ , с <sup>-1</sup>	$w_a$	$w_b$	$\xi$			
		м/с <sup>2</sup>		0,15	0,45	0,75	1
1	$\omega_0 = 2,5$	1	1	Резонанс	0,110000	0,0661010	0,0496894
2		3	3		0,329914	0,1981360	0,1487170
3		3	10		0,329782	0,1979630	0,1485420
4		10	3		1,099710	0,6604540	0,4957240
5		3	15		0,329687	0,1978360	0,1484160
6		15	3		1,349570	0,9906820	0,7435860
7	$\omega_0 / 2$ $= 1,25$ Субгармон- ійні коливання	1	1	0,130020	0,110905	0,0941927	0,0793500
8		3	3	0,389417	0,332314	0,2819150	0,2373970
9		3	10	0,387163	0,339915	0,2796080	0,2352390
10		10	3	1,298060	1,140430	0,9397170	0,7913230
11		3	15	0,386474	0,338340	0,2779130	0,2338590
12		15	3	1,947090	1,710650	1,4095000	1,1869800
13	$\omega_0 / 3$ $= 0,83$ Субгармон- ійні коливання	1	1	0,110504	0,109731	0,1004580	0,0932015
14		3	3	0,331016	0,328430	0,3005490	0,2783220
15		3	10	0,329287	0,325772	0,2976650	0,2743310
16		10	3	1,103390	1,094770	1,0018300	0,9277410
17		3	15	0,328061	0,323891	0,2956390	0,2725110
18		15	3	1,65508	1,642150	1,5027400	1,3916100
19	$2\omega_0 = 5$ Биття	1	1	Резонансу немає	0,0273533	0,0235304	0,0200020
20		3	3		0,0822427	0,0707352	0,0601209
21		3	10		0,0828793	0,0712361	0,0605205
22		10	3		0,2741720	0,2357840	0,2004030
23		3	15		0,0833300	0,0715904	0,6080320
24		15	3		0,4112140	0,3536760	0,3006050
25	$3\omega_0 = 7,5$ Биття	1	1	Резонансу немає	0,0120460	0,0105930	0,0097958
26		3	3		0,0362657	0,0316432	0,0294926
27		3	10		0,0367120	0,0320451	0,0298588
28		10	3		0,1208850	0,1054780	0,0983086
29		3	15		0,0370285	0,0323305	0,0301188
30		15	3		0,1813280	0,1582160	0,1474630

4. Добуто залежності  $x = f(t)$ , коли амплітудне збурення по осі  $Oz$  у 3,33 рази більше, ніж у другому випадку,  $w_a = 10 \text{ м/с}^2$ , а по осі  $Oy$   $w_b = 3 \text{ м/с}^2$ . Амплітудні значення усталених вимушених коливань у цьому разі приблизно в три рази більші, ніж у другому випадку. Вплив відносного коефіцієнта затухання на роботу АГ такий самий, як і в попередніх випадках (табл. 2.2).

5. Проведений аналіз графіків функціональної залежності  $x = f(t)$  при  $w_a = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 15 \text{ м/с}^2$  дає змогу зробити ті самі висновки, що і в п.3 (табл. 2.2).

6. Дослідження графіків залежностей  $x = f(t)$ , відповідним значенням  $w_a = 15 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 3 \text{ м/с}^2$  дає змогу зробити висновки, аналогічні висновкам до п.4. Виняток полягає лише у тому, що в даному випадку амплітуди вимушених коливань АБГ більші в 1,5 рази, ніж для п.3 (табл. 2.2).

7. Проаналізуємо результати моделювання рівняння руху АГ для співвідношення частот  $2\omega = \omega_0 = 1,25 \text{ с}^{-1}$ . Добуто залежність  $x = f(t)$  для  $w_a = w_b = 1 \text{ м/с}^2$ . Відносний коефіцієнт затухання  $\xi$  становив: 0,15; 0,45; 0,75; 1.

Визначено, що навіть для дуже малого демпфірування  $\xi = 0,15$  резонанс АГ не виникає. В разі збільшення  $\xi$  АГ одразу ж входить у режим усталених вимушених коливань, спостерігають зменшення амплітуди вимушених коливань АГ (табл. 2.2).

8. Розглянемо випадок  $w_a = w_b = 3 \text{ м/с}^2$  і таких самих значень  $\xi$ , що і в попередніх варіантах. Тут, як і для п.7, можна бачити, що навіть при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  резонансу немає. При  $\xi = 0,45$  АГ одразу ж входить в усталений режим вимушених коливань. Зі збільшенням  $\xi$  амплітуди вимушених коливань АГ зменшуються (табл. 2.2).

9. Проаналізуємо залежності  $x = f(t)$  при  $w_a = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 10 \text{ м/с}^2$  (у 3,3 рази більших, ніж у випадку п.8). Очевидно, що навіть при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  резонанс не виникає. При  $\xi = 0,45$  АГ одразу ж входить у режим усталених вимушених коливань. Зі зростанням  $\xi$  амплітуди

вимушених коливань АГ зменшуються. Амплітудні значення вимушених коливань АГ незначно відрізняються від відповідних амплітудних значень для п.8 (табл. 2.2).

10. Добуто залежності  $x = f(t)$  для  $\omega = 1,25 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 10 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 3 \text{ м/с}^2$ . Амплітудні значення вимушених коливань АГ у цьому разі приблизно в три рази більші, ніж у випадку п.8. Зі збільшенням відносного коефіцієнта затухання  $\xi$  амплітуда вимушених коливань АГ зменшується. Резонанс не виникає навіть при малих  $\xi = 0,15$  (табл. 2.2).

11. Аналіз залежностей для параметрів  $\omega = 1,25 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 15 \text{ м/с}^2$ , дає змогу зробити ті самі висновки, що й у п.9 (табл. 2.2).

12. Дослідження залежностей для  $\omega = 1,25 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 15 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 3 \text{ м/с}^2$  дає висновки, аналогічні зробленим у п.10. Однак, амплітуди усталених вимушених коливань приблизно в 1,5 раз більші, ніж у випадку п.10 (табл. 2.2).

13. Проаналізуємо роботу БГ при  $3\omega = \omega_0 = 0,83 \text{ с}^{-1}$ . Моделюванням параметричного рівняння (2.8) БГ на ЕОМ добуто залежності  $x = f(t)$  для  $w_a = w_b = 1 \text{ м/с}^2$  і  $\xi = 0,15; 0,45; 0,75; 1$ , з яких видно, що навіть при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  резонанс не виникає. При збільшенні  $\xi$  БГ переходить у режим усталених вимушених коливань. Зі збільшенням демпфірування спостерігають зменшення амплітуди усталених вимушених коливань БГ (табл. 2.2).

14. Зі знайдених залежностей для  $\omega = 0,83 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = w_b = 3 \text{ м/с}^2$  і таких самих значень  $\xi$  видно, що як і в попередньому випадку п.13, навіть при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  резонансу немає. При  $\xi = 0,75$  БГ одразу ж входить в усталений режим вимушених коливань. Зі збільшенням  $\xi$  амплітуди вимушених коливань зменшуються (табл. 2.2).

Амплітуди усталених вимушених коливань БГ приблизно у 3 рази більші за амплітуди при відповідних  $\xi$  у разі п.13.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						71
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

15. Добуто залежності  $x = f(t)$  при  $\omega = 0,83 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 10 \text{ м/с}^2$  (приблизно у три рази більші, ніж у випадку п.14), з яких видно, що навіть при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  резонанс не виникає. При  $\xi = 0,75$  БГ зразу ж входить у режим усталених вимушених коливань. Амплітудні значення вимушених коливань БГ несуттєво відрізняються від відповідних значень для п.14 (табл. 2.2).

16. Якщо амплітудне значення збурення по осі чутливості приблизно в три рази більше, ніж у випадку п.14,  $w_a = 10 \text{ м/с}^2$ , а по осі  $0y$  попереднє, як у разі п.14,  $w_b = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $\omega = 0,83 \text{ с}^{-1}$ , то видно, що амплітудні значення усталених вимушених коливань приблизно в три рази більші, ніж для п.14. Зі збільшенням демпфірування амплітуди вимушених коливань БГ зменшуються. Резонанс не виникає навіть при малих  $\xi$ , наприклад при  $\xi = 0,15$ . Зі збільшенням  $\xi$  БГ одразу ж входить у режим усталених вимушених коливань (табл. 2.2).

17. Добуто залежності  $x = f(t)$  для  $\omega = 0,83 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 15 \text{ м/с}^2$ , аналіз яких дає змогу зробити ті самі висновки, що й у випадку п.15 (табл. 2.2).

18. З аналізу залежностей  $x = f(t)$  при  $\omega = 0,83 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 15 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 3 \text{ м/с}^2$  можна зробити висновки, аналогічні п.16. Однак, у цьому разі амплітуди усталених вимушених коливань у 1,5 рази більші, ніж у вказаному випадку (табл. 2.2).

19. Проаналізуємо роботу БГ при  $\omega = 2\omega_0 = 5 \text{ с}^{-1}$ . Добуто залежності  $x = f(t)$  для значень  $w_a = w_b = 1 \text{ м/с}^2$  і  $\xi = 0,15; 0,45; 0,75; 1$ , з яких видно, що при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  БГ здійснює складні коливання, які є результатом складання вільних або власних коливань БГ з частотою  $\omega_0$  і вимушених коливань з частотою  $\omega$ . Унаслідок збільшення демпфірування коливання БГ вирівнюються і прямують до ідеальних усталених коливань. Зі зростанням  $\xi$  амплітуда усталених вимушених коливань БГ зменшується.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						72
Змн.	Арк	№докум.	Підпис	Дата		



Резонанс не виникає навіть при малому демпфіруванні, наприклад, при  $\xi = 0,15$  (табл. 2.2).

20. Добуто залежності  $x = f(t)$ , коли  $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = w_b = 3 \text{ м/с}^2$  для таких самих  $\xi$ . Як і в разі п.19, навіть при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  резонансу немає, БГ здійснює биття. В разі збільшенні  $\xi$  коливання вирівнюються і прямують до ідеальних усталених вимушених коливань, амплітуди усталених вимушених коливань зменшуються, однак вони в 3 рази більші за амплітуди, відповідні до п.19.

21. З аналізу залежностей з параметрами  $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 10 \text{ м/с}^2$  (у 3,3 рази більші, ніж у випадку п.20), видно, що навіть при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  резонанс не виникає, однак, як і у попередніх випадках, є складні коливання, що при збільшенні  $\xi$  вирівнюються і прямують до усталених коливань. Амплітудні значення вимушених коливань БГ несуттєво відрізняються від відповідних значень для випадку п.20 (табл. 2.2).

22. З аналізу залежності  $x = f(t)$  для  $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 10 \text{ м/с}^2$  (приблизно в три рази більші, ніж у випадку п.20),  $w_b = 3 \text{ м/с}^2$ , видно, що амплітудні значення вимушених коливань БГ приблизно в три рази більші, ніж для п.20 при відповідних  $\xi$ . Зі збільшенням  $\xi$  амплітуда вимушених коливань БГ зменшується. Резонанс не виникає навіть при малих  $\xi$ , наприклад,  $\xi = 0,15$ , однак мають місце складні коливання, які вирівнюються і прямують до усталених значень вимушених коливань при збільшенні  $\xi$ , починаючи з  $\xi = 0,45$  (табл. 2.2).

23. Знайдено залежності  $x = f(t)$  при  $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 15 \text{ м/с}^2$ , аналіз яких дає змогу зробити такі самі висновки, що й у випадку п.21 (табл. 5.2).

24. Дослідження залежностей для  $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 15 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 3 \text{ м/с}^2$  дає змогу зробити висновки, аналогічні п.22. Однак, у даному випадку амплітуди усталених вимушених коливань БГ у 1,5 рази більші, ніж у вказаному випадку (табл. 2.2).

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						73
Змн.	Арк	№ доквм.	Підпис	Дата		

25. Добуто залежності  $x = f(t)$  для випадку, коли  $\omega = 3\omega_0 = 7,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = w_b = 1 \text{ м/с}^2$ ,  $\xi = 0,15; 0,45; 0,75; 1$ , з яких видно, що при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  БГ здійснює биття. У разі збільшення демпфірування коливання БГ вирівнюються і прямують до усталених коливань. Зі зростанням  $\xi$  амплітуда останніх зменшується. Резонанс не виникає навіть при  $\xi = 0,15$ . Амплітуди усталених вимушених коливань у цьому і наступних випадках при  $\omega = 7,5 \text{ с}^{-1}$  у 1,5 рази менші, ніж у разі  $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$  (табл. 2.2).

26. Аналіз залежностей  $x = f(t)$  при  $\omega = 7,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = w_b = 3 \text{ м/с}^2$  і таких самих значеннях  $\xi$ , що й у попередніх випадках, свідчить, що навіть при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  резонансу немає, АГ здійснює биття. При збільшенні  $\xi$  коливання приладу вирівнюються і прямують до ідеальних усталених, амплітуди яких зі зростанням  $\xi$  зменшуються. Однак, вони приблизно в три рази більші, ніж у попередньому випадку п.25 (табл. 2.2).

27. З аналізу залежностей при  $\omega = 7,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 10 \text{ м/с}^2$  (у 3,3 рази більші, ніж у випадку п.26) видно, що навіть при малому демпфіруванні  $\xi = 0,15$  резонанс не виникає, однак мають місце биття, які при збільшенні  $\xi$  вирівнюються і прямують до усталених коливань. Амплітудні значення вимушених коливань АГ несуттєво відрізняються від відповідних значень для випадку п.26 (табл. 2.2).

28. Аналіз залежності  $x = f(t)$  для  $\omega = 7,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 10 \text{ м/с}^2$  (приблизно в 3 рази більші, ніж у випадку п.26),  $w_b = 3 \text{ м/с}^2$  свідчить, що амплітудні значення вимушених коливань АГ приблизно в три рази більші, ніж у разі п.26 для відповідних  $\xi$ . Зі збільшенням  $\xi$  амплітуда вимушених коливань приладу зменшується. Резонанс не виникає навіть при малих  $\xi$ , наприклад,  $\xi = 0,15$ , однак мають місце складні коливання, які вирівнюються і прямують до усталених значень вимушених коливань при збільшенні  $\xi$  (табл. 2.2).

29. Знайдено залежності  $x = f(t)$  при  $\omega = 7,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 15 \text{ м/с}^2$ , аналіз яких дає змогу зробити такі самі висновки, що й у випадку п.27 (табл. 2.2).

30. Дослідження залежності  $x = f(t)$  для  $\omega = 7,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_a = 15 \text{ м/с}^2$ ,  $w_b = 3 \text{ м/с}^2$  дає змогу зробити висновки, аналогічні п.28. Однак, у цьому разі амплітуди усталених вимушених коливань АГ у 1,5 рази більші, ніж у вказаному випадку (табл. 2.2).

Графіки деяких функціональних залежностей для певних значень  $w_a, w_b, \omega$ , а також значень коефіцієнта демпфірування  $\xi$  наведено на рис. 2.3, 2.4, 2.5.

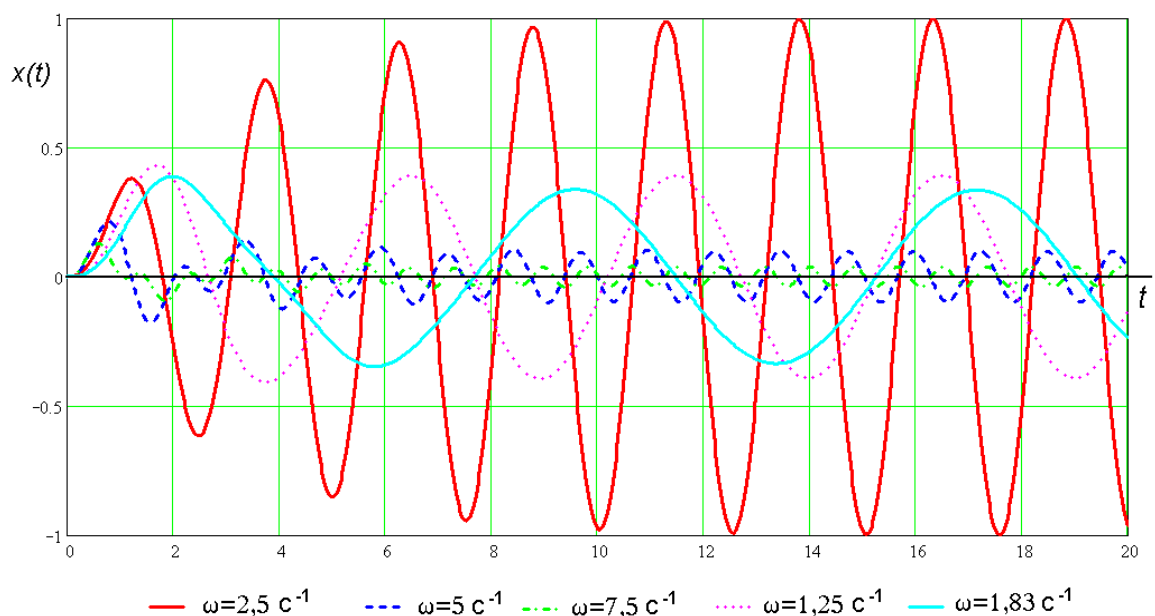


Рис. 2.3 Графіки зміни вихідного сигналу  $x(t)$  для різних значень  $\omega$

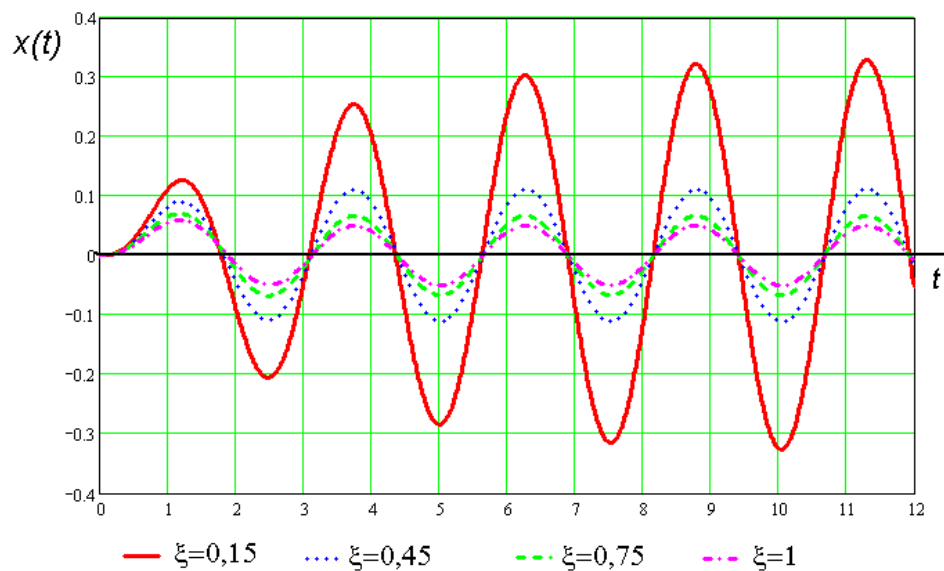


Рис. 2.4 Графіки зміни вихідного сигналу  $x(t)$  для різних значень коефіцієнта демпфірування  $\xi$

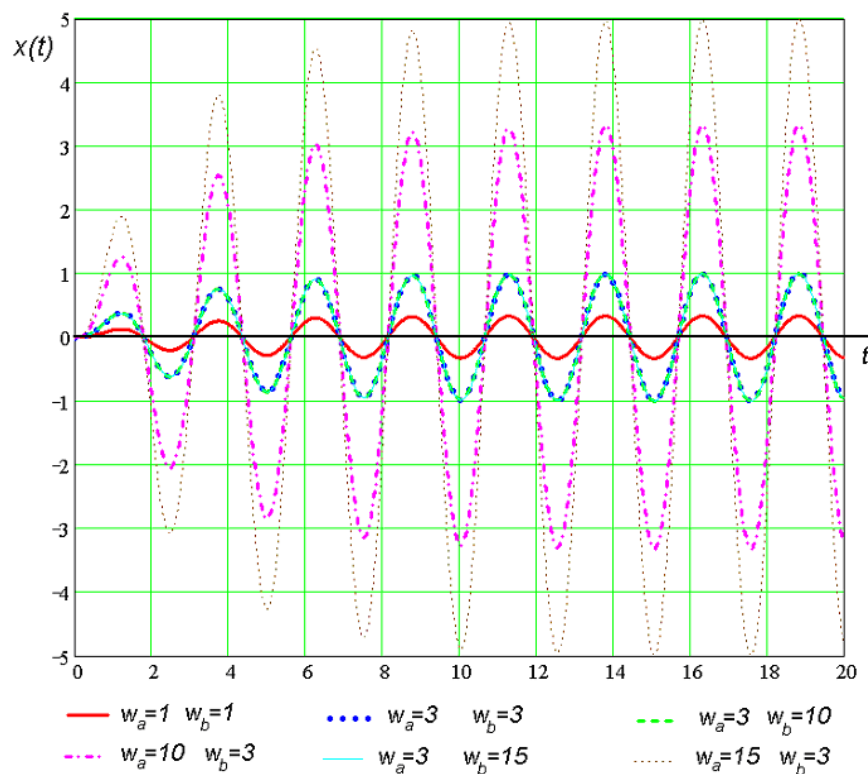


Рис. 2.5 Графіки зміни вихідного сигналу  $x(t)$  для різних значень  $w_a, w_b$

Для того щоб зіставити викладені вище відомості, результати моделювання рівнянь руху АГ на ЕОМ зведено в табл 2.3.

Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата

Таблиця 2.3

## Амплітуди усталених вимушених коливань АГ

$\omega, \text{с}^{-1}$	$\alpha, \text{рад}$
0,84	$0,23 \cdot 10^{-7}$
1,24	$0,64 \cdot 10^{-7}$
2,6	$1,87 \cdot 10^{-6}$
5,1	$0,935 \cdot 10^{-6}$
7,6	$4,8 \cdot 10^{-7}$

Порівнявши амплітуди усталених вимушених коливань АГ при  $\omega = \omega_0$ ,  $3\omega = \omega_0$ ,  $2\omega = \omega_0$ ,  $\omega = 2\omega_0$ ,  $\omega = 3\omega_0$ ;  $\xi = 1$ ;  $w_a = w_b = 1 \text{ м/с}^2$ , обчисленні відповідно до виразу (2.3) (табл. 2.3), бачимо, що амплітуди усталених вимушених коливань АГ найбільші за умови рівності частоти власних коливань АГ та збурюючого впливу.

## 2.4 Зв'язок вимірювальної системи з ЕОМ

### 2.4.1 Розробка функціональної схеми автоматизації вимірювальної системи

Насамперед проаналізуємо всі можливі напрямки систем автоматизації. Звичайно вони повинні забезпечувати виконання по можливості всіх функцій:

- налагодження;
- підготовка до роботи;
- початкова ініціалізація системи;
- проведення вимірювань;
- збір даних про вимірюваний параметр;
- збереження даних про вимірюваний параметр;
- передача даних на обробку (зв'язок з ЕОМ);

- моніторинг стану системи в цілому та кожного пристрою окремо;
- створення захисту пристроїв системи в цілому та кожного пристрою окремо;
- забезпечення найвищої можливої точності результатів вимірювання [5].

Використавши принцип модульності при побудові автоматичної системи можливо здійснити розподіл функцій по блоках (модулях) локальних систем автоматики.

Використовуючи принцип поєднання, можливо забезпечити поєднання окремих локальних блоків (модулів) у загальну автоматичну систему. Поєднання можливо здійснити за допомогою ліній зв'язку, які також розподілені за функціональними ознаками:

- лінії передачі даних (ввід/вивід);
- лінії зворотного зв'язку (регулювання параметрами);
- лінії організації вибірки даних (адресні лінії);
- лінії управління (ініціалізація, початкове обнуління, включення/виключення окремих функцій, забезпечення послідовності виконання операцій...).

Взагалі всі лінії за принципом передачі сигналів можливо поділити на аналогові і дискретні.

Забезпечення точності вимірювань відбувається за умови використання еталонів. Точність передачі еталонних та вимірювальних значень забезпечується впровадженням цифрових ліній зв'язку одночасно з підвищенням розрядності дискретних передавальних сигналів.

Таким чином, система автоматики в узагальненому вигляді складається з наступних частин:

- прилад (гравіметр) та різноманітні пристрої й апарати;
- лінії зв'язку із приладом (лінії вводу сигналів від датчиків; лінії зворотного зв'язку);

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						78
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

- локальні системи автоматики (системи управління параметрами, в тому числі і захист; системи збору даних, в тому числі і збереження);
- лінії зв'язку з еталонами;
- еталони;
- лінії зв'язку з обчислювальною технікою (дискретні інформаційні канали вводу/виводу; дискретні канали вибірки (адресації));
- порти обчислювальної техніки.

Дану систему автоматики в узагальненому вигляді можна представити структурною схемою, яка зображена на рис.2.6.



Рис.2.6 Узагальнена структурна схема автоматики балістичного гравіметра

## 2.4.2 Огляд основних функціональних завдань системи автоматизації вимірювань

Основні функціональні завдання системи автоматики в цілому були розглянуті в попередньому пункті. Тепер розглянемо функції систем автоматики окремих елементів автоматичного балістичного гравіметра (таблиця 2.4).

## Функції систем автоматики окремих елементів балістичного гравіметра

Функціональний елемент системи	Призначення локальних систем автоматичного управління
Насос високого тиску	<ul style="list-style-type: none"> <li>- управління приводом</li> <li>- опитування датчика високого тиску</li> <li>- захист приводу</li> </ul>
Насос низького тиску	<ul style="list-style-type: none"> <li>- управління приводом</li> <li>- опитування датчика низького тиску</li> <li>- захист приводу</li> </ul>
Двигун каретки	<ul style="list-style-type: none"> <li>- управління приводом</li> <li>- опитування датчика переміщень</li> <li>- опитування датчика відриву тестової призми</li> <li>- захист приводу</li> </ul>
Інтерферометр	<ul style="list-style-type: none"> <li>- підрахунок числа інтерференційних смуг</li> <li>- фільтрація перешкод у вимірному каналі фотодетектора</li> <li>- сходження опорного та основного променів, утворюючих інтерференційну картинку</li> <li>- чіткість інтерференційної картинки</li> <li>- інтенсивність інтерференційної картинки (max чутливість інтерферометра)</li> <li>- контроль різниці ходу опорного та основного променів</li> </ul>
Сейсмоізолятор	<ul style="list-style-type: none"> <li>- управління приводом корекції</li> <li>- контроль динаміки руху опорної призми</li> <li>- регулювання зниженням рівня збурюючих коливань земної поверхні</li> </ul>
Рубідієвий еталонний генератор	<ul style="list-style-type: none"> <li>- опитування еталону генератора</li> <li>- підрахунок тривалості часових інтервалів з max можливою точністю у відповідності з рухом тестової маси</li> <li>- збереження даних про динаміку руху в локальній пам'яті</li> <li>- перевірка рубідієвого генератора за стандартизованими</li> </ul>
Обчислювальна техніка	<ul style="list-style-type: none"> <li>- збір даних про стан елементів системи</li> <li>- розрахунки та обробка даних на результат</li> <li>- інтерфейс користувача</li> <li>- збереження звітів, реєстрів,...</li> <li>- деякі можливі функції регулювання</li> </ul>



Лазер	<ul style="list-style-type: none"> <li>- переключення режимів</li> <li>- регулювання струму прогріву середовища всередині лазерної головки в залежності від температури навколишнього середовища</li> <li>- видача сигналу похибки процесу стабілізації за двома модами</li> <li>- контроль поточної внутрішньої температури лазерної головки</li> <li>- установка інтенсивності вихідного променя</li> <li>- контроль інтенсивностей 2-х лінійно-поляризованих ортогональних мод</li> <li>- включення/виключення лазерної головки</li> </ul>
-------	---

### 2.4.3 Розробка функціональної схеми головного модуля вимірювання динаміки руху тестової маси

Функціональні завдання головного модуля визначаються у такій послідовності:

- прийом сигналів від фотодатчика;
- відфільтровування певної полоси частот вимірювального сигналу;
- підсилення вимірювального сигналу;
- перетворення сигналів у послідовність імпульсів;
- співвіднесення його з еталонним значенням;
- запис результатів у пам'ять;
- по закінченню вимірювального циклу приєднання до загальної шини даних та шини адреси;
- передача управління локальною пам'яттю персональному комп'ютеру;
- на початку наступного циклу вимірювань від'єднання від загальної шини даних і надалі незалежне здійснення циклу роботи із локальною пам'яттю: вимірювання, детектування, фільтрація перетворення, співвіднесення, запис у пам'ять.

По відношенню до організації вимірювань цикл роботи схеми можливо описати за такою схемою: кидок тестової маси → вимірювання параметрів переміщення → запис масиву даних у локальну пам'ять → зчитування з локальної пам'яті масиву даних у пам'ять ПК → сервісні операції → наступний кидок → ...

Ближче до практичної реалізації зобразимо роботу схеми наступним чином. Коли тестова маса знаходиться у верхньому вихідному положенні, проходження фільтра рівень сигналу знижується (але тільки у випадку пасивного фільтра), тому його можна підсилити.

Далі отриманий відфільтрований і підсилений сигнал проходить через тригер Шмідта, де синусоїда змінної частоти перетворюється на послідовність прямокутних імпульсів змінної частоти. Таким чином, здійснюється перетворення сигналу у дискретну форму для подальшої цифрової обробки.

Послідовність прямокутних імпульсів змінної частоти направляється на цифровий лічильник числа інтерференційних смуг. Як тільки лічильник нарахував 1000 імпульсів (1000 інтерференційних смуг), дешифратор поточного значення лічильника формує імпульс фіксації/скиду. Імпульс скиду обнулює лічильник числа інтерференційних смуг, імпульс фіксації виконує наступні функції:

- інкрементує лічильник інтервалів на одиницю, формуючи першу адресу запису у локальну пам'ять;
- є імпульсом стробуючого сигналу запису у буферний регістр часового інтервалу від лічильника часових інтервалів.

Після скиду лічильника числа інтерференційних смуг він встановлюється в нульовий стан, його дешифратор формує імпульс CLOCK запису значення часового проміжку, яке було раніше записано у буферний регістр локальної пам'яті.

Підрахунок часового проміжку, що відповідає проходженню тестовою масою 320 мкм, здійснюється системою «рубідієвий генератор -

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						82
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

лічильник імпульсів». В даному випадку використовуються ті ж принципи, що і для системи «фотодетектор - лічильник імпульсів»: фільтрація підсилення, перетворення у цифрову форму. Зазначимо, що після запису даних від лічильника часових інтервалів у буферний регістр, імпульс запису у пам'ять скидає лічильник часових інтервалів у нульовий стан (для підготовки до підрахунку тривалості наступного часового інтервалу).

Одразу з появою імпульсу запису у пам'ять, починається підрахунок числа інтерференційних полос для наступного проміжку. Такі дії системи повторюються для певного числа проміжків (інтервалів по 1000 смуг). Наприклад, для вільного польоту тестової маси у 20 см = 0,2 м кількість інтервалів:  $0,2 \text{ м} / 320 \text{ мкм} = 625$  проміжків.

Коли лічильник числа проміжків фіксує кінцеве значення кількості проміжків, декодер даного лічильника формує сигнал блокування буфера часового проміжку, і буфер відключає свої виходи від входів пам'яті, а також сигнал блокування дешифратора лічильника інтерференційних смуг, таким чином, блокуючи утворення сигналів CLOCK. Тоді адреса не змінюється і запис у пам'ять блокується. Цей самий сигнал блокування переключає схему управління модулем на сигнали управління від комп'ютера і подає сигнал запиту на порт комп'ютера. Таким чином, пам'ять підключається до порту і відключається від вимірювального модуля і сигналом запиту вимагає прочитки себе через порт у пам'ять комп'ютера.

В якості порту використовується стандартний паралельний LPT порт, який існує в кожному ПК та застосовується, зазвичай, для підключення принтера. Як правило, порт одночасно працює в режимі прийому і передачі. Для організації каналу вводу даних у ПК застосовується частина LPT порту STATE-PORT. Для отримання даних від ПК використовується частина LPT порту DATA-PORT.

Організуємо роботу порту наступним чином.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						83
Змн.	Арк	№ док-м.	Підпис	Дата		

## Організація роботи LPT порту

Частина порту	Призначення
STATE-PORT:1-4	Канал вводу даних в ПК
DATA-PORT:1-7	Канал виводу адреси від ПК
DATA-PORT:8	Канал виводу сигналу CLOCK від ПК
STATE-PORT:5	Канал вводу сигналу запиту на зчитування в ПК

Таким чином, отримуємо 7-ми розрядну шину адреси, 4-х розрядну шину даних, дві допоміжні сигнальні лінії: запит та CLOCK.

Відключення сигналів управління пам'яттю і підключення їх до схеми зв'язку з ПК відбувається за допомогою мультиплексорів. Вони здійснюють відключення пам'яті від схеми вимірювання по приходу на відповідні входи (входи тих: ) сигналу від дешифратора лічильника кількості інтервалів, на кінці циклу вимірювань одночасно з подачею на порт ПК сигналу запиту на зчитування у пам'ять ПК.

Після подачі сигналу запиту на зчитування у пам'ять ПК, як зазначалось, пам'ять підключається до схеми зчитування. Адреса пам'яті формується тим самим лічильником інтервалів, але сигнал CLOCK (тактовий сигнал лічильника) вже отримується від LPT порту ПК. Оскільки розрядність шини даних обмежена, здійснюється почергова вибірка по 4 біти із загального слова, переданого по сигналах від окремого дешифратора вибірки. Дешифратор вибірки підключений до шини адреси. Така система зчитування діє наступним чином:

Сигнал CLOCK від порту LPT → збільшення значення виходу адресного лічильника на 1 → підключення дешифратора вибірки до ША → подача на дешифратор вибірки адреси перших 4-х біт → зчитування перших 4-х біт з ШД на порт LPT → подача адреси других 4-біт на дешифратор вибірки

→ зчитування других 4-х біт з ШД на порт LPT → ... → подача адреси останніх 4-х біт слова з ШД на LPT → наступний сигнал CLOCK від порту LPT → ...

Внутрішній програмний лічильник у ПК зупинить цикл, коли значення даного лічильника буде дорівнювати останній можливій адресі локальної пам'яті (встановленій в системі вимірювань). Зазначимо, що адресний простір ША, який залишився в локальній пам'яті, може бути використаний для запису/зчитування станів різних інших систем автоматики (у процесі моніторингу системи в цілому).

Для того, щоб не заважати роботі системи під час вимірювання динаміки руху вільно падаючої тестової маси, всі процеси зчитування/запису (моніторингу) проводяться у момент, коли каретка зупинила падіння тестової маси і направляє її вгору, в точку її вихідного положення.

Ідеологія системи полягає у наступному: локальні системи автоматики працюють незалежно від ПК під час циклу вимірювання, і лише у часовий проміжок між циклами є можливість коректувати, зчитувати, вводити нові дані у реєстри стану через порт LPT персонального комп'ютера.

Такого принципу побудови бажано дотримуватись при розробці системи автоматики через те, що цикл “падіння – вимірювання” проходить дуже швидко (приблизно 0,2 с), і вносити корекцію у вимірювальний процес під час його проходження недоцільно.

Розроблена функціональна схема автоматичної системи головного модуля вимірювання динаміки руху тестової маси зображена на схемі 1 (див. дод. 3).

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						85
Змн.	Арк	№ док-м.	Підпис	Дата		

#### 2.4.4 Розробка функціональної схеми модуля збору та формування аналогових сигналів

При розгляді основних завдань та функцій модульної системи автоматики вимірювальної системи, що досліджується, з'ясована необхідність надати вимірювальній автоматичній системі певних функціональних властивостей: збору аналогових сигналів від датчиків; формування аналогових сигналів установки для різноманітних локальних вузько направлених систем автоматичного регулювання.

Виконання таких функцій можливо реалізувати в окремому модулі на базі АЦП, схеми опитування аналогових датчиків, компараторів і таке інше. Відмітимо, що при реалізації схеми формування аналогових сигналів установки виникає умова: сигнали установки повинні підтримуватися на заданому рівні весь час, доки не виникне необхідність їх зміни. Виконати таку умову стандартними методами означає необхідність забезпечення кожного аналогового виходу своїм власним АЦП у поєднанні з регістрами пам'яті. Але таке рішення в даному випадку неможливо назвати бажаним. Вартість системи при збільшенні числа аналогових виходів лінійно зростає.

Із даної ситуації можливо знайти вихід, якщо використати ідею аналогової пам'яті. На жаль, такі набори мікросхем вимагають залучення прецизійних елементів, вартість яких також не є низькою. Але із часом, враховуючи бурхливий розвиток електронної промисловості в даному напрямку, ми отримаємо дешеві мікросхеми з достатніми точнісними характеристиками. Аналогова пам'ять реалізується за допомогою конденсаторів, високоомних ключів на польових транзисторах та, зазвичай, двох буферних ( $K = 1$ ) елементів входу та виходу на базі операційних підсилювачів. Операційні підсилювачі повинні мати якомога менший струм на вході для того, щоб знизити розряд конденсатора зберігання.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						86
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

“Ввід – вивід” аналогових сигналів відбувається ззовні. Вхідні аналогові сигнали забезпечують датчики різних технологічних величин. Окрема система повинна отримати дані та видати відповідний сигнал корекції або нової установки на зовнішні пристрої. Зовнішніми пристроями, наприклад, можуть бути локальні системи автоматики, про які вже згадувалося раніше. А системою отримання, переробки та видачі інформаційних даних може бути мікропроцесор (або мікроконтролер) в поєднанні з АЦП і пристроями аналогової пам’яті. Але визначений нами режим передбачає використання ЕОМ для збору і можливої видачі інформаційних сигналів.

Застосувавши обраний принцип 3-шинної організації (шина вводу даних ШД, шина адреси ША, сигнал CLOCK - шина управління ШУ), забезпечимо зв’язок ЕОМ з розробленою системою збору та формування аналогових сигналів.

Функціональна схема системи зображена на схемі 2 (див. дод. Ж).

Опишемо роботу системи. Шина адреси підключена до частини паралельного LPT порту ПК (DATA-PORT). Сигнали шини даних ШД та сигнал CLOCK підключені до частини LPT порту, яка називається STATE-PORT.

ПК має можливість видавати сигнали 7 розрядів на ША і 1 сигнал на ШУ (CLOCK). ПК здатний приймати 4-бітні сигнали з шини даних ШД (в даному випадку ця одна лінія не використовується).

Для початку процесу ПК видає на ША 7-розрядну адресу, якщо старші 3 біти адреси «001». Після цього включається дешифратор схеми видачі аналогових сигналів (4 на 16). Наприклад за адресою 0010010 до порту підключається ЦАП (DAC). Сигналом CLOCK (послідовність прямокутних імпульсів) ПК записує у ЦАП потрібне число у двійковій формі. Для перетворення послідовності імпульсів у відповідний паралельний код використовується звичайний блок лічильників.

Схема побудована таким чином, що за відповідною адресою дешифратор схеми видачі аналогових сигналів може сформувати управляючий сигнал, який виконає скид всього блоку лічильників і в АЦП запишеться «0». Якщо цього не відбулось, то відповідно до записаного в ЦАП коду на виході АЦП сформується  $E_{вих.}$ , яке пропорційне записаному в АЦП двійковому коду. Тепер необхідно обрати пристрій аналогової пам'яті, в який має бути записано значення  $E_{вих.}$  з ЦАП. Функцію вибору виконує дешифратор схеми видачі аналогових сигналів. На дешифратор схеми видачі аналогових сигналів подається адреса необхідного пристрою аналогової пам'яті і дешифратор формує управляючий сигнал запису  $E_{вих.}$  ЦАП у відповідну адресу комірки аналогової пам'яті.

Водночас є можливість проконтролювати записаний на входах лічильників паралельний код. Так само ПК подає на ША адресу буфера лічильника. Буфер за сигналом від дешифратора адреси підключає виходи лічильника до ШД, яка передає 2-й код на LPT порт ПК (по 4 біти з одного буфера).

Отже, ми розглянули функціонування системи видачі аналогових сигналів. У подальшому розглянемо роботу системи збору аналогових сигналів датчиків.

Система збору аналогових сигналів датчиків безпосередньо пов'язана із системою видачі аналогових сигналів. Коли ПК видає на ША адресу, старші 3 біти якої 010, схема налагоджена на прийом сигналу від аналогових датчиків. Аналоговий комутатор АК підключає аналоговий канал до схеми тимчасового зберігання. Канал обирається формуванням молодших 4-х біт на ША. Таким чином, за сигналом 010  $\rightarrow$  \*0\* відбувається запис аналогового значення каналу в схему тимчасового зберігання. Схема тимчасового зберігання має структуру аналогічну до комірки аналогової пам'яті і тому потребує підключення конденсатора зберігання  $C_{збер.}$ . В схемі передбачений компаратор, який порівнює вихід ЦАП. Підганяючи вихід ЦАП до виходу комірки тимчасового зберігання, схема здійснює АЦ -

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						88
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		



перетворення. Сигнал виходу компаратора «0» свідчить про те, що аналогові сигнали зрівнялись. Двійкове число, відповідне аналоговому значенню каналу, зчитується з виходів лічильників через буфери обміну (формуючи завчасно їх адреси на ША). Сигнал про те, що аналогові значення зрівнялись, потрапляє на шину даних через елемент &, дозвіл на видачу видає дешифратор схеми формування аналогових сигналів. Тут також можливо використати 5-й сигнал вводу на порт LPT. Запропонована нами система автоматизації потребує ретельного підбору базових елементів.

## 2.4.5 Підбір елементів схеми автоматизації вимірювань

### 2.4.5.1 Розрахунок параметрів вибору та підбір елементів схеми головного модуля вимірювання динаміки руху тестової маси

Вихідні дані:

- початкова частота рубідієвого генератора:  $F_{руб.}=6,8 \cdot 10^9$  Гц;
- частота зміни інтенсивності інтерференційної картини:

$$\omega_{int.} = \frac{2 \cdot \omega_{лаз.} V r}{c}, \text{ Гц};$$

- вихідна частота лазерного випромінювання:

$$\omega_{лаз.} = \frac{c}{0,6328 \text{ мкм}}, \text{ Гц};$$

- величина одного відліку лічильника числа інтерференційних смуг:  
1000 смуг (змін інтенсивності)  $L_{1000} = 320$  мкм;

- тривалість польоту тестової маси:  $t_{пол.} = 0,2$  с;
- довжина польоту тестової маси:  $L_{пол.} = 0,2$  м.

Кількість відліків інтервалів по 1000 інтерференційних смуг:

$$N_{1000} = \frac{0,2 \text{ м}}{320 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 625.$$

Визначаємо вимоги до розрядності шини адреси локальної пам'яті (ШАЛП):

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						89
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

$$n_{ШЛП} = \frac{Ln(625)}{Ln(2)} = 10 \text{ біт.}$$

Мінімальна швидкість руху тестової маси визначає тривалість періоду проходження нею 320 мкм (1000 інтерференційних смуг). Таким чином, для фіксованої частоти рубідієвого еталону вимоги до розрядності слова (його значення дорівнює часовому інтервалу) збільшуються при зменшенні швидкості руху тестової маси (збільшується часовий проміжок).

Саме тому вимірювання починаємо тоді, коли тіло вже набуло певної швидкості. Приймаємо, що вимірювання починаються через 0,025 с після початку руху тестової маси.

Оцінка швидкості в момент початку вимірювань:

$$V_{r, \text{поч.вим.}} = V_0 + g \cdot t,$$

де  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ;

$t = 0,025 \text{ с}$ ;

$V_0 = 0 \text{ м/с}$ ;

$$V_{r, \text{поч.вим.}}(t = 0,025 \text{ с}) = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,025 \text{ с} = 0,245 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Період проходження 320 мкм тестовою масою в момент початку вимірювань:

$$T_{\text{поч.вим.}} = \frac{L_{1000}}{(V_{r, \text{поч.вим.}})};$$

$$T_{\text{поч.вим.}} = (0,245 \frac{\text{м}}{\text{с}})^{-1} \cdot 320 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cong 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Кількість відліків лічильника імпульсів рубідієвого генератора, що визначає вимоги до розрядності слова, яке записується у пам'ять на одному інтервалі:

$$N_{\text{інт.поч.вим.}} = \frac{T_{\text{поч.вим.}}}{T_{\text{руб.}}} = T_{\text{поч.вим.}} \cdot F_{\text{руб.}};$$

$$N_{\text{інт.поч.вим.}} = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ с} \cdot 6,8 \cdot 10^9 \text{ Гц} = 8,9 \cdot 10^6.$$

Вимоги до розрядності слова даних та розрядності пам'яті ШЛДП:

$$n_{\text{ліч.рубід.}} = n_{\text{ШЛДП}} = n_{\text{сл.}} = \frac{Ln(8,9 \cdot 10^6)}{Ln(2)} = 23 \text{ біта.}$$

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						90
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

Тоді, якщо розрядність слів, які потрапляють на порт LPT 4 біта, то вихідна розрядність дешифратора вибірки:

$$n_{\text{деш.виб.вих.}} = \frac{23}{4} \cong 6 \text{ виходів.}$$

Для адресації 6-ти виходів дешифратору вибірки необхідно мати:

$$n_{\text{деш.виб.вих.}} = \frac{\text{Ln}(6)}{\text{Ln}(2)} = 3 \text{ входи.}$$

Вимоги до розрядності лічильника кількості інтерференційних смуг:

$$n_{\text{ліч.інтерф.}} = \frac{\text{Ln}(1000)}{\text{Ln}(2)} = 10 \text{ біт.}$$

Частота зміни інтенсивності інтерференційної картини на початку вимірювань:

$$\begin{aligned} f_{\text{інтерф.поч.вим.}} &= \frac{2 \cdot \omega_{\text{л}} \cdot V_{\text{поч.вим.}}}{c} = \frac{2 \cdot \frac{c}{\lambda_{\text{л}}} \cdot V_{\text{поч.вим.}}}{c} = \frac{2 \cdot V_{\text{поч.вим.}}}{\lambda_{\text{л}}} = \\ &= \frac{2 \cdot V_r(t = 0,025c)}{0,6328 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = \frac{2 \cdot 0,245 \frac{\text{м}}{c}}{0,6328 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 0,7743 \text{ МГц} = 774,3 \text{ кГц}. \end{aligned}$$

Частота зміни інтенсивності інтерференційної картини в момент закінчення вимірювань:

$$\begin{aligned} f_{\text{інтерф.кін.вим.}} &= \frac{2 \cdot \omega_{\text{л}} \cdot V_{\text{кін.вим.}}}{c} = \frac{2 \cdot \frac{c}{\lambda_{\text{л}}} \cdot V_{\text{кін.вим.}}}{c} = \frac{2 \cdot V_{\text{кін.вим.}}}{\lambda_{\text{л}}} = \\ &= \frac{2 \cdot V_r(t = 0,2c)}{0,6328 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = \frac{2 \cdot g \cdot t}{\lambda_{\text{л}}} = \frac{2 \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{c^2} \cdot 0,2c}{0,6328 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 6,19 \text{ МГц} \approx 6,2 \text{ МГц}. \end{aligned}$$

Вимоги до полоси частот смугового фільтра:

$$\Delta f_{\text{ф.}} = f_{\text{інтерф.кін.вим.}} - f_{\text{інтерф.поч.вим.}} = 6,2 \text{ МГц} - 774,3 \text{ кГц} = 5,42 \text{ МГц.}$$

Вимоги до частоти лічильника числа інтерференційних смуг:

$$f_{\text{ліч.інтерф.пях}} = f_{\text{інтерф.кін.вим.}} = 6,2 \text{ МГц.}$$

Вимоги до частоти лічильника числа інтервалів:

$$f_{\text{ліч.інтерф.пях}} = \frac{f_{\text{ліч.інтерф.пях}}}{1000} = 6,2 \text{ кГц.}$$

Вимоги до частоти лічильника імпульсів рубідієвого генератора:

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						91
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

$$f_{ліч.рубід.} = f_{рубід.} = 6,8 \cdot 10^9 \text{ Гц.}$$

Підбір елементів головного модуля вимірювання динаміки тестової маси. При виборі цифрових елементів схеми електричної принципової необхідно враховувати розрядність, навантажувальну здатність, частотний діапазон. Вимоги до розрядності та частотного діапазону були розроблені в попередніх пунктах. Було встановлено, що частотний діапазон для більшості елементів схеми вимірювання складає:

$$f_{діап.} = (0,8 \div 6,2) \text{ МГц.}$$

Вибір будемо здійснювати серед поширених на сьогоднішній день сімейств цифрових елементів: МОП, КМОП, ТТЛ. Серед згаданих сімейств КМОП (комплементарні МОП - структури) і ТТЛ (транзисторно-транзисторна логіка) найбільш поширені та вони є загальнодоступні. Сімейство КМОП відрізняється тим, що має низькі значення споживаної потужності. Сімейство ТТЛ має великий робочий частотний діапазон. Більш нові швидкодіючі КМОП вже досягли такого ж як і у ТТЛ частотного робочого діапазону, але одночасно втратили переваги за потужністю споживання. Тому як основу для більшості елементів застосуємо набір мікросхем сімейства ТТЛ.

В сімейство ТТЛ входить велика кількість різноманітних “підсімейств”, кожне з яких виконує одні й ті ж функції та використовує одні й ті ж самі рівні логічних сигналів. Різниця між ними полягає в тому, що вони мають неоднакову швидкодію та потужність розсіювання. В наш час для більшості застосувань найкращим вважається малопотужне підсімейство ТТЛ-Шоткі, елементи якого позначаються буквами LS, що стоять після цифри 74.

Таким чином, приймаємо вибір серії 7400TTL підсімейства LS.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						92
Змн.	Арк	№докум.	Підпис	Дата		

## Короткий огляд характеристики серії 7400TTL

Показник	Значення
- затримка	25 нс
- потужність	2 мВт
- максимальна частота переключення	25 МГц
- вхідний струм (низького рівня), max	0,4 мА
- вихідний струм(відвід), при низькому рівні: 0,4 В	4 мА
- навантажувальна здатність для 74LS**	10

Тепер можемо обрати номери окремих цифрових елементів електричної принципової схеми (окрім, звичайно, лінійних підсилювачів, тригера Шмітта, фільтра та надшвидкодіючої частини схеми, що виконує функцію підрахунку кількості еталонних часових імпульсів від рубідієвого генератора).

*Мультиплексори:* 4 виходи, 8 входів, комутує або 4 входи «А» на виходи, або 4 входи «В» на виходи, мікросхема 74LS157.

*Інвертори:* прямий вхід/інвертований вихід, мікросхема 74LS04 (6 вентилів в одному корпусі).

*Повторювачі:* мікросхема 74LS365 (6 вентилів в одному корпусі).

*Пам'ять:* час вибірки  $\approx 100$  нс (10 МГц), вхідні сигнали вибору мікросхеми та вхід дозволу запису *Ш*, ємність 1К (10-розрядна адресна шина) по 4 біти у слові, мікросхема (широко розповсюджена) 2114, статичний запам'ятовуючий пристрій (1 К на 4).

*Регістр буферний* (фіксатор даних): з тактовим дозволяючим входом, 8 біт запису, 20-виводний корпус, виходи з 3-ма станами, мікросхема 74LS374.

*Дешифратор вибірки:* 4 на 16, мікросхема 7442.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						93
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

*Лічильники:* 4-розрядний лічильник із входами передумовки, реверсивний, виходи переносу старшого розряду, мікросхема 74LS191.

*Елемент «І»* з 4-ма інверсними входами та інверсним виходом: це звичайний елемент «АБО» з 4-ма входами (інверсна логіка), створимо на мікросхемах «АБО» 74LS08 (4 елементи в одному корпусі).

*Тригер запуску-скидання:* використаємо D-тригерну мікросхему 7474 (2 D-тригери), вхід стробування, вхід скидання.

При виборі тригера Шмідта також необхідно враховувати частотний діапазон: 0,8-6,2 МГц. Тригер Шмідта представляє собою компаратор з випадковим гістерезисом відносно входів. Для запобігання випадковим переключенням від шумових сигналів на входах необхідно всюди, де тільки можливо, використовувати гістерезис. До того ж, бажано не використовувати високочастотні компаратори, тому будемо обирати серед тих, що дієздатні в нашій полосі частот:  $f = 0,8 \div 6,2 \text{ МГц} \equiv \tau = 1,25 \div 0,16 \text{ мкс}$ . Чутливість багатьох компараторів  $\approx 2 \text{ мВ}$ , тому будемо вважати, що після підсилювача напруги та фільтра на вхід компаратора поступає сигнал  $U_{\text{сигн.}} = \pm 2 \text{ В}$ .

Обираємо мікросхему компаратора фірми Precision Monolithics (PMI) СМР 01с: 1 компаратор в корпусі, час переключення 110 нс (9 МГц), сумісність з ТТЛ (потрібно тільки обрати напруги живлення), можливість живлення від одного джерела +5 В, низький рівень на виході: насичений транзистор, джерела живлення:  $U_+$  (+5 ÷ +30 В),  $U_-$  (0 ÷ -30 В),  $U_{\text{заг.}}$  (+5 ÷ +36 В), синфазна входна напруга  $\min U_-$ ,  $\max U_+$ ,  $I_{\text{зн.мах.}} = 0,9 \text{ мкА}$ ,  $U_{\text{здв.мах.}} = 2,8 \text{ мВ}$ ,  $U_{\text{диф.мах.}} = 11 \text{ В}$ .

Зазначимо, що низький рівень виходу при переключеннях компаратора дорівнює рівню напруги джерела живлення  $U_-$ .

Якщо вважати, що шуми можуть не перевищувати 50 мВ, можемо організувати гістерезис 50 мВ за допомогою резистора зворотного додатного зв'язку. Врахуємо, що опорна напруга  $U_{\text{оп.}} = 0 \text{ В}$ . Паралельно резистору зворотного зв'язку увімкнемо конденсатор  $C = 100 \text{ пФ}$ , який не знижує суттєво швидкодії, але захищає схему від паразитних імпульсів, що

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						94
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

виникають при перетині вхідним сигналом порогового значення. Схема пристрою див. дод. Г.

#### **2.4.5.2 Підбір елементів схеми модуля формування та збору допоміжних аналогових сигналів**

*Аналоговий комутатор:* 1 вихід, 16 аналогових входів, 4-розрядна ША, діапазон вхідних сигналів  $\pm 10\text{В}$  (цифрові входи адреси сумісні з КМОП рівнями), ключі виконані за схемою «розмикання перед замиканням» (це означає, що за час зміни адресних сигналів на входах комутатора, між вхідними каналами не відбувається замикання), мікросхема HARRIS HI-506.

*Схема тимчасового збереження аналогових сигналів:* мікросхема вибірки та зберігання LF398 фірми NSC, швидкість спаду рівня збереженого сигналу  $10\text{ мкВ/на } 40\text{ мкс}$  за умови застосування конденсатора збереження  $C_{\text{збер.}}=1000\text{ пФ}$  (для сигналу, наприклад, в  $5\text{ В}$  спад складає  $5\%$  за секунду),  $10\text{ мкс}$  на вибірку та збереження.

*Цифро-аналоговий перетворювач:* мікросхема LMDAC08, 8-розрядний цифро-аналоговий перетворювач із симетрично суміщеним двійковим кодом, час відклику для повного діапазону  $3\text{ мкс}$ ; стандартна схема застосування передбачає використання мікросхеми ОП: LF356 (див. дод. Е).

*Аналогова комірка пам'яті* (див. дод. Є): високоточна схема вибірки/збереження на базі ОП LF356 та ПТ-ключів LF11333 - АН143 (рекомендація взята з технічної документації).

*Буфер:* мікросхема 74LS125, ТТЛ рівні, блок з 4-х прямих повторювачів, виходи з 3-ма станами, сигнали дозволу на передачу, однонаправлений.

*Вибір конденсаторів збереження.* Для мікросхеми LF398 документується швидкість зниження  $10\text{ мкВ}$  за  $40\text{ мкс}$  (при  $C_{\text{збер.}}=1000\text{ пФ}$ ):

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						95
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

$$\frac{dU}{dt} = \frac{I_{\text{вит.}}}{C_{\text{збер.}}} = \frac{10 \text{ мкВ}}{40 \text{ мкс}};$$

$$I_{\text{вит.}} = C \cdot \frac{dU}{dt} = 1000 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{10 \text{ мкВ}}{40 \text{ мкс}} = 0,25 \cdot 10^{-9} \text{ А.}$$

Якщо оберемо конденсатор більшої ємності, то можемо значно зменшити похибку від розрядки  $C_{\text{збер.}}$  струмом  $I_{\text{вит.}}$ :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{I_{\text{вит.}}}{C_{\text{збер.}}} = \frac{0,25 \cdot 10^{-9} \text{ А}}{1 \text{ мкФ}} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ В/с.}$$

Тоді похибка для записаного сигналу в 5 В визначається:

$$0,25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{100}{5} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\%}{\text{секунду}}.$$

Ми отримали цілком задовільну точність, тому залишаємо  $C_{\text{збер.}} = 1 \text{ мкФ}$ . Конденсатори додатково мають свій власний струм витоку (само розряджаються), тому варто застосовувати полістеронові, полікарбонатні або полісульфонові конденсатори.

*Мікросхеми ОП*, що застосовуються в аналоговій комірці пам'яті LP356: для них документується струм входів  $I_{\text{зм.}} = 0,2 \text{ нА}$ . Аналогічно як і для комірки аналогової пам'яті на LF356 ( $C_{\text{збер.}} = 1 \text{ мкФ}$ ):

$$\frac{dU}{dt} = \frac{I_{\text{вит.}}}{C_{\text{збер.}}} = \frac{0,2 \text{ нА}}{1 \text{ мкФ}} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ В/с.}$$

Похибка 0,004 % за секунду. Для того, щоб конденсатори  $C_{\text{збер.}}$  в комірках пам'яті не розрядились до кінця, ПК періодично підключається і поновлює інформацію в них за допомогою ЦАП.

*Дешифратори, лічильники та елементи простої логіки* (вентилі) обираємо такі ж як і для схеми головного модуля.

Таким чином, запропоновано відбір саме цих елементів, так як саме вони найбільш відповідають технічним умовам створення автоматизованої системи вимірювання абсолютного значення прискорення сили тяжіння.

При подальшому дослідженні необхідно змонтувати дану схему автоматизації та провести експериментальне дослідження її конструкторських і функціональних особливостей в лабораторних умовах.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						96
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		



У даному розділі МД представлена функціональна схема автоматизації процесу вимірювання значення  $g$ , визначено основні принципи побудови автоматизованої системи вимірювань прискорення сили тяжіння. Розроблено два модулі локальної системи вимірювань та представлені функціональні схеми цих модулів:

1) модуль вимірювання динаміки руху тестової маси (МДТМ) - конструктивним елементом даного модуля є лінія підключення до стандартного LPT порту ЕОМ;

2) модуль формування та збору допоміжних аналогових сигналів (МАДС).

Розроблені вимоги та підібрана основна елементна база для реалізації МАДС і МДТМ у вигляді електричних принципових схем. Функціональні схеми побудовані з врахуванням їх максимального наближення до електричних принципових схем.

Перспективою даного дослідження є пошук шляхів щодо розробки схем фільтра сигналу фотодатчика, лічильника кількості імпульсів від рубідієвого генератора, схем конденсаторів з малим струмом витоку та операційних підсилювачів з великими вхідним опором і малим струмом зміщення.

## Висновки до розділу 2

1. В результаті моделювання було отримано графіки зміни вихідного сигналу  $x(t)$  для різних значень частоти збурень  $\omega$ , коефіцієнта демпфірування  $\xi$  та різних значень амплітуд збурюючих віброприскорень  $w_a = w_b$ .

2. З отриманих графіків видно, що:

- при частоті збурень  $\omega = \omega_0 = 2,5 \text{ c}^{-1}$  виникає головний резонанс, найбільш небезпечний для АГ;

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						97
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

- при частотах  $\omega = \omega_0/2 = 1,25 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega = \omega_0/3 = 0,83 \text{ с}^{-1}$  вихідний сигнал не спотворюється (встановлюються субгармонійні коливання);
- при частотах  $\omega = 2\omega_0 = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega = 3\omega_0 = 7,5 \text{ с}^{-1}$  вихідний сигнал спотворюється (встановлюється биття);
- встановлено, що коефіцієнт демпфірування  $\xi$  доцільно збільшувати у випадку головного резонансу  $\omega = \omega_0$  ( $\xi = 0,75$ ) та у випадку  $\omega = 2\omega_0$ ,  $\omega = 3\omega_0$ , коли встановлюється биття ( $\xi = 0,45$ );
- збільшення амплітуд горизонтальних прискорень не впливає на амплітуду вимушених коливань АБЛГ  $x(t)$ ;
- амплітуди вимушених коливань по осі чутливості БЛГ прямо пропорційні амплітудам збуджуючих віброприскорень по осі чутливості АГ.

3. Цифрове моделювання впливу на АГ параметрів збурень, а також власних параметрів підтвердило основну перевагу АГ над відомими гравіметрами – його вищу точність (середнє квадратичне значення похибки становить 0,01 мГл).

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						98
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

## Розділ 3 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

### «Абсолютний балістичний гравіметр на шасі»

#### 3.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в двох попередніх розділах дослідження абсолютного балістичного гравіметра, запропоновано створення даної системи на шасі і огляд її аналогів. В цьому розділі буде проведено аналіз даного стартап проекту, основна мета якого, полягає у визначенні можливості виходу даного продукту на ринок і проведенні порівняння з аналогічними рішеннями від конкурентів.

У таблиці 3.1 наведено зміст ідеї та базові потенційні ринки збуту, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів для даної системи.

Таблиця 3.1.

#### Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Абсолютний балістичний гравіметр на шасі	Видобуток корисних копалин	1. Пошуку покладів корисних копалин у труднодоступних місцях
	Геодезійні лабораторії	1. Побудови моделей руху глибинних мас 2. Винаходження глибинних щільнісних неоднорідностей

Отже, пропонується розробити абсолютний балістичний гравіметр, який буде встановлено на шасі і за допомогою якого можна буде вимірювати прискорення сили тяжіння у різних місцевостях у тому числі у труднодоступних місцях для дослідження явищ тяжіння Землі.

Далі потрібно провести аналіз потенційних техніко-економічних переваг даної ідеї в порівнянні з пропозиціями конкурентів:

– визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

– визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

– проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтра- льна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1 ВІРМ	Конкурент 3 Інститут географічної зйомки			
1.	Вартість програмного забезпечення	Низька	Висока	Висока			+
2.	Торгівельна марка	Немає	є	є	+		
3.	Показники скорочення часу	Високі	Високі	Високі		+	
4.	Показники автоматизації процесу	Високі	Високі	Високі		+	

5.	Патент на систему	Є	Є	Є		+	
6.	Унікальні рішення для окремих станів	Є	Немає	Немає			+

Після проведення порівняння характеристик запропонованої системи з конкурентами було визначено слабкі, сильні та нейтральні характеристики і властивості ідеї автоматизованої системи, що вважається підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. Товар має патент на винахід і має захист від копіювання, але в разі створення унікального рішення для окремих станів, потрібно патентувати кожну систему окрему.

### 3.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології (методику отримання зусиль, мови програмування для створення програми розрахунку навантажень), за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

#### Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Робота абсолютного балістичного гравіметра у складних умовах	Технології визначення сили тяжіння Землі	Наявні	Доступні

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок що наш проект можна реалізувати, виходячи з того, що технології для оптимізації роботи станів є в наявності і не потрібно залучати великі суми коштів від інвесторів. Але потрібно враховувати, якщо нам потрібно створити адаптивну систему

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						101
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

для певного підприємства, може виникнути проблема, що не всі технології для адаптивності системи створені. Тому для різних станів потрібно проводити дослідницьку роботу і створювати нові технології, а для цього потрібні кошти інвесторів..

Тому для створенні стандартної системи ми маємо всі технології у доступності, а для створення адаптивних систем під певний стан потрібно залучати кошти інвесторів і проводити дослідницьку роботу.

### 3.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Це дозволяє розрахувати подальші напрямки розвитку проекту із урахування стану ринкового середовища, пропозицій рішень конкурентів, попиту потенційних клієнтів (великих металургійних підприємств).

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4.

#### Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	30 000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Невелика кількість клієнтів, монополізація ринку
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	75%

За попередньою оцінкою ринок має стогнуючу динаміку, невеликий попит на запропонований продукт і велику монополізацію ринку окремими

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		102

фізичними підприємцями (науковцями, спеціалістами в галузі вимірювань), які мають контакти з технічними командами підприємств. Ринок є привабливим для входження, хоча ми і будемо мати велику конкуренцію, але за рахунок автоматизації систем для загальних металургійних станів та створенню адаптивних систем під будь-які стани наш продукт є конкурентоспроможним.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 3.5).

Таблиця 3.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Визначення сили тяжіння Землі у труднодоступних місцях	Лабораторні дослідження та видобуток корисних копалин	Можливості переміщення гравіметра дистанційно	Можливість вимірів сили тяжіння Землі у різних місцях

Потенційною групою клієнтів для нашого продукту маю стати геодезичні лабораторії та для пошуку корисних копалин.

При застосуванні даної технології існують певні загрози. (таблиця 3.6). Найбільшою загрозою являється стогнуючий стан ринку, а також невелика кількість підприємств, яким потрібна наша технологія. Також проблема ймовірності збоїв роботи системи і не постійне використання технології.

Таблиця 3.6.

## Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Наявність аналогічних систем у конкурентів	Отримання більшої кількості клієнтів за рахунок зменшення ціни
2.	Старіння	Можлива поява більш якісних систем	Моніторинг трендів на ринку та постійні технологічні новації
3.	Відсутність попиту	Не бажання використання даної технології на постійній основі	Реклама, спілкування з технічними спеціалістами лабораторій
4.	Обслуговування	Можливість збоїв роботи системи	Автоматизований контроль помилок системи
5.	Технічний	Відсутність спеціалістів та аналогів в даній області	Пошук нових кадрів, підвищення кваліфікацій для теперішніх кадрів

В таблиці 5.6 ми визначили загрози, які перешкоджають ринковому впровадженню даного продукту, а також реакцію даної компанії, щоб звести до мінімальних значень їх вплив. Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (таблиця 3.7).

Таблиця 3.7.

## Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Попит	Мала конкуренція на ринку	Модернізація продукту, впровадження нових ідей
2.	Політико-правові	Збільшення ринків збуту	Вихід на світові ринки
3.	Економічні	Політика протекціонізму,	Зниження ціни на продукт, зменшення податків



		підтримка виробництва державою	
4.	Науково-технічні	Зміна технології виготовлення	Впровадження нової технології змінить вартість товару
5.	Покращення іміджу компанії	Збільшення кількості контактів потенціальних покупці	Розширення компанії

В таблиці 3.7. ми визначили фактори можливостей, які будуть сприяти ринковому впровадженню даного продукту, а також можливості для компанії і її реакцію на той чи інший фактор можливостей.

В таблиці 3.8. приведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку, як проявляються данні характеристики и вплив діяльності підприємства на конкурентоспроможність.

Таблиця 3.8.

#### Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Монополія	Домінація окремих спеціалістів для розробки окремих систем	Виготовлення більш якісної системи, рекрутинг спеціалістів до компанії
2. Національний	Конкуренція фірми на міжнародному ринку	Реклама продукції на іноземних форумах та виставках
3. Міжгалузева	Виробники виготовляють продукцію, яка задовольняє різні потреби	Виготовлення товару с кращою якістю и меншою ціною
4. Товарно-видова	Різноманітні товари для різних потреб	Розробка нових технологій
5. Цінова	Зменшення ціни для підвищення кількості проданих товарів	Підвищення якості продукту, зменшення ціни

В даній таблиці ми проаналізували ринки збуду для нашого продукту і визначили головні риси конкурентів на ньому.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9.

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	ВІРМ			Сучасні закордонні лабораторії	Вимірювальні пересувні лабораторії
Висновки	Велика інтенсивність конкурентної боротьби за окремі підприємства	Є можливості і звязки для входу в ринок, які не використовуються	Пошук нових постачальників датчиків	Диктують вимоги до ціни і якості продукту	Створення універсальних систем

Отже, відповідно до наведеної вище таблиці аналізу конкуренції за М.Портером головними силами, які впливають на конкуренцію є споживачі і постачальники.

Таким чином в структурному підході до аналізу, ми бачимо, що тип конкуренції – монополістична при малій кількості споживачів.

Після всіх аналізів ми визначаємо та обґрунтовуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Проект впровадженно у виробництво на одному с підприємств України і наступною ціллю є пошук нових покупців для нашого продукту.

Таблиця 3.10.

## Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Точність	Більша точність вимірювань
2	Автоматизація	Автоматизація вимірювання
3	Новизна	Нові технології для здешевлення продукції
4	Ціна	Менша ціна в порівнянні з конкурентами

В таблиці 3.10 на основі аналізу проведеного в таблиці 3.9 було визначено та обґрунтовано основні фактори конкурентоспроможності проекту.

Таблиця 3.11.

## Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Power\_analys»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з <u>закордонні фірми-</u> <u>виробники</u>						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Наявність патентів	14		+					
2	Велика кількість постачальників	16				+			
3	Висока якість	17					+		
4	Технічна підтримка	14		+					
3.	Ціна	19							+

З таблиць 3.10 та 3.11 бачимо, що фактори конкурентоспроможності мають великий позитивний внесок при створенні нової системи контролю станів. Основною перевагою та головним досягненням є висока якість продукту та низька ціна для споживача. Це дає перевагу над аналогічними системами і завдяки цьому, проект може стати успішним на ринку.

Таблиця 3.12.

## SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Вартість програмного забезпечення</li> <li>- Простіші вимірювання</li> <li>- Підвищення продуктивності</li> <li>- Відсутність аналогів</li> </ul>	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Продукт, який не є дуже відомим на ринку</li> <li>- Потрібні великі інвестиції для підвищення рівня бренду</li> <li>- Стогнуючий ринок, невелика кількість підприємств, яким потрібна система</li> </ul>
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Збільшення продаж;</li> <li>2. Отримання державних замовлень для державних підприємств;</li> <li>3. Розширення ринку за рахунок іноземних замовників;</li> <li>4. Зменшення податкового тиску, отримання тендерів на послуги.</li> </ol>	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Цінова конкуренція в зв'язку з появою нових гравців на ринку.</li> <li>2. Залежність від курсу гривні</li> <li>3. Поява нових технологій у конкурентів</li> <li>4. Політичні ризики, через нестабільну ситуаціях;</li> <li>5. Втрата клієнтів через неякісну технічну підтримку;</li> <li>6. Зменшення продажів через різні фактори.</li> </ol>

В таблиці 3.12. наведено перелік слабких та сильних сторін проекту. Ринкові загрози та можливості складаємо на основі факторів можливостей та загрол, які ми приводили у таблицях вище. Ринкові можливості та загрозу на відміну від факторів не є реалізованими на ринку та мають певну вірогідність здійснення.

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки для створення необхідних умов для виведення проекту на ринок в орієнтований час їх ринкової реалізації з урахуванням потенційних проектів конкурентів, що можуть будуть запущені.

Таблиця 3.13.

## Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	12 місяців
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	2 роки
3	Стратегія виходу з ринку	Середня	2 роки

Після проведення нами альтернатив ринкового впровадження стартап-проекту, треба обрати ту, яка має більшу вірогідність отримання грошових ресурсів, а також є найшвидшою і оптимальнішою в реалізації. З зазначених альтернатив обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.

## 3.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 3.14.

## Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Державні лабораторії	Готові	Середній попит	Середня	Низька
2	Приватні лабораторії	Готові	Середній попит	Середня	Висока

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						109
Змн.	Арк	№ док-м.	Підпис	Дата		

3	НДІ	Готові	Середній попит	Середня	Середня
---	-----	--------	-------------------	---------	---------

Цільові групи обрано:

Під час аналізу потенційних груп споживачів було визначено, що основними групами будуть геодезійні лабораторії.

За результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи, яким ми будемо пропонувати свої послуги для створення абсолютного гравіметра на шасі. Наша стратегія буде — диференційованого маркетингу, виходячи з того, що ми працюємо з конкретним сегментом ринку і розробляємо програму ринкового впливу виходячи з наявної інформації.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку.

Таблиця 3.15.

#### Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Компенсація слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.	Надання унікального товару для кожної лабораторії	Залучення найкращих розробників технічного і програмного забезпечення. Менше ціна в порівнянні з конкурентами	Стратегія диференціації

За основну стратегію розвитку буде взято стратегію диференціації, яка передбачає надання готовому товару унікальних властивостей виходячи з потреб кожного окремого підприємства, що робить наш товар відмінним від конкурентів.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						110
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 3.16).

Таблиця 3.16.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Проект є “першопрохідцем”	Компанія буде шукати нових споживачів серед приватних лабораторій	Не буде копіювати	Стратегія заняття вільної ніші

За базову стратегію буде прийнята стратегія заняття вільної ніші, коли в якості цільового ринку буде обрано один сегмент малого розміру. Головне завдання — це постійна турбота про наявних клієнтів, а також пошук нових. Головною перевагою являється статус “першопрохідця” на нашому ринку і менша ціна від продукції можливих конкурентів.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальників і готового продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект

Таблиця 3.17.

## Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Висока точність вимірювання і адаптивність до будь-якої системи	Стратегія диференціації	Висока якість продукту та точність.	Якість. Ціна. Технічна підтримка.

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає, що компанія буде працювати за стратегією диференціації і головними критеріями конкурентоспроможності будуть якість, точність та ціна.

## 3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 3.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 3.18.

## Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Створення програмного забезпечення для оптимізації контролю станів.	Збільшення якості виробу, зменшення кількості аварій на станах	Постійна підтримка та оновлення. Постійне вдосконалення алгоритму розрахунку та знаходження нових режимів



За рахунок переваг даного товару і обраної маркетингової стратегії, що передбачає надання товару унікальних можливостей для споживача за нижчою ціною ніж у конкурентів буде розроблено маркетингову програму стартап-проекту.

Таблиця 3.19.

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Абсолютний гравіметр на шасі  Переваги : - підвищення якості виміру сили тяжіння; - дослідження у труднодоступних місцях; - дистанційне керування приладом		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Економічні	Нм	Вр
	2. Призначення	Нм	Тх
	3. Надійність	М	Тл
	4. Технологічні	М	Тх
	5. Транспортабельні	М	Тх
	6. Безпека	М	Тх
	Якість: відповідає нормам ДСТУ2499:2017		
	Пакування: встановлення готової система з програмним забезпечення співробітниками проекту		
	Марка: назва організації-розробника		
III. Товар із підкріпленням	Розповсюдження реклами		
	Після продажу технічна підтримка співробітниками проекту		

В таблиці 3.19. було створено трьох-рівневу модель нашого товару, що включає ідею товару та його переваги, основні характеристики готового товару, критерії якості і спосіб пакування.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 3.20).

Таблиця 3.20.

#### Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	60 000 грн	40 000 грн	Високий	20 000 — 50 000 грн

В таблиці 3.20 було проаналізовано рівень ринкових цін на товари-замінники і товари-аналоги, а також середній рівень доходів цільової групи. За отриманими даними було встановлено нижню і верхню межу ціни на нашу систему.

Таблиця 3.21.

#### Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Модифікована закупівля. Кількість, ціна та послуги змінюються в залежності від клієнта.	Доставка товару на підприємства, його встановлення, подальше налаштування і калібрування	Канал нульового рівня	Власна система. Виробник продає товар клієнту на пряму і використовує різні способи прямого продажу

Виходячи з специфічною закупівельної поведінки цільових клієнтів, було обрано власну систему збуту, коли виробник продає товар клієнту через

власні канали збуту. Доставка товару відбувається одразу на підприємство з подальшим встановленням, налаштуванням і калібруванням.

Таблиця 3.22.

### Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Перегляд інформаційних ресурсів компаній-конкурентів із якісними товарами	Професійні виставки, рекламні статті, інтернет ресурси	Доступність та правдивість інформації про компанію та товар	Створення інформаційного фону про нові системи та формування бренду компанії	Висока якість, низька ціна, універсальний підхід до кожного клієнта

Висока якість готової системи і низька ціна в порівнянні з конкурентами є основною концепцією товару, за рахунок яких він буде конкурентоспроможним.

На основі поведінки клієнтів було обрано власну систему збуту товару, тобто коли виробник продає товар напряму клієнту.

Ціноутворення ґрунтується на основі аналізу аналогів і встановлюється в момент фінансово-економічного аналізу проекту.

### 3.6 Висновки

В даному розділі було проведено аналіз абсолютного балістичного гравіметра на шасі, який дозволяє автоматизувати вимірювання сили тяжіння Землі на відстані та у труднодоступних місцях, що дозволяє використовувати дану технологію для пошуку корисних копалин та геодезичних вимірюваннях.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						115
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

Було проведено аналіз потенційних техніко-економічних переваг даної ідеї в порівнянні з пропозиціями конкурентів: вартість програмного забезпечення, показники скорочення часу, показники автоматизації процесу, унікальні рішення.

Проаналізувавши технологічну здійсненність проекту, можна зробити висновок що наш проект можна реалізувати, виходячи з того, що технологія для вимірювання гравітації Землі у різних місцях дистанційно є в наявності і не потрібно залучати великі суми коштів від інвесторів. Але потрібно враховувати, якщо нам потрібно створити адаптивну систему для певного підприємства, може виникнути проблема, що не всі технології для адаптивності системи створені. Тому для різних станів потрібно проводити дослідницьку роботу і створювати нові технології, а для цього потрібні кошти інвесторів.

За проведеною попередньою оцінкою, ринок має стогнуючу динаміку, невеликий попит на запропонований продукт і велику монополізацію ринку окремими фізичними підприємцями (науковцями, спеціалістами в галузі вимірювань), які мають контакти з технічними командами підприємств. Ринок є привабливим для входження за рахунок автоматизації систем для загальних металургійних станів та створенню адаптивних систем під будь-які стани наш продукт є конкурентоспроможним.

Узагальнюючи проведений аналіз стартап проекту можна зробити висновок що продукт є конкурентоспроможним і його подальша реалізація є доцільною за рахунок сильних сторін і наявного попиту на універсальні системи контролю.

					<i>МД ПІ7114 ПЗ</i>	Арк
						116
Змн.	Арк	№ док-м.	Підпис	Дата		

## Загальні висновки даної роботи

Викладені в дисертаційній роботі дослідження дозволили вирішити актуальну і складну науково-технічну задачу, що має важливе народногосподарське значення, - підвищити точність вимірювання ПСВ шляхом використання нового абсолютного гравіметра. Здобуто такі результати:

1. Запропоновано і досліджено нову схему вимірювальної системи АГ, що забезпечує вищу точність вимірювань ПСВ за рахунок використання АГ, підключеного до ЕОМ.

2. Встановлено, що абсолютний гравіметр має найвищу точність з відомих гравіметрів (0,01мГл).

3. Показано, що абсолютний гравіметр можна вдосконалити шляхом:

- підвищення точності вимірювань за рахунок покращення збіжності та збільшення числа враховуючих систематичних похибок;
- зменшення габаритів та компактності транспортабельних гравіметрів;
- підвищення продуктивності вимірювань, за рахунок зниження випадкової похибки;
- спрощення процедури вимірювання за допомогою їх автоматизації.

4. Проведено розрахунок і оцінку основних похибок АГ. Пораховано, що сумарні похибки абсолютного гравіметра сягають 1 мкГал.

5. На основі аналізу елементів конструкції приладу визначено конструктивні джерела шумів, запропоновано ряд шляхів їх усунення. Як наслідки негативних дій шумів розглядаються такі явища: флуктуація частоти та некогерентність лазерного випромінювання, фазові похибки через наявність повітряно-вакуумного інтерфейсу, власні шуми фотодетектора, електромагнітні та вібраційні шуми від приводів кареток, обмежені стабілізуючі властивості сейсмоізолюючої системи, шуми каналу передачі сигналів від приладу до електронної обчислювальної системи,

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						117
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

нестабільність частоти імпульсів рубідієвого генератора, обертання тестового тіла під час вільного падіння.

В роботі представлені розроблені нами функціональні схеми двох модулів (МАДС і МДТМ) локальної автоматизованої системи вимірювань прискорення сили тяжіння балістичним лазерним гравіметричним приладом.

Конструктивні особливості локальної автоматизованої системи в цілому визначаються наступним чином:

- розбиття системи на 4 функціональні блоки (прилад, модулі локальної системи, еталони, стандартний порт ПК).
  - модулі МАДС і МДТМ представляють дві головні підсистеми загальної схеми автоматизації обчислень;
  - конструктивною особливістю модулів є 3-х шинна система (ШД - шина даних, ША - шина адреси, ШУ - шина управління);
  - наявність елементу пам'яті в модулі МДТМ для збереження основного метрологічного параметру під час проведення та обчислення даних вимірювань;
  - завантаження даних в ЕОМ лише в момент часу між кидками тестової маси;
  - збереження аналогових установок в мережі комірок аналогової пам'яті, при чому ми відмовляємось від створення великої кількості ЦАП;
  - зв'язок з ЕОМ реалізується через стандартний LPT порт;
  - принципи побудови функціональних схем забезпечують можливість переходу до схем електричних принципових.
- Вирішено задачу підвищення точності АГ більше, ніж у п'ять разів шляхом:
- використання нової математичної моделі АГ, що дає змогу автоматизувати весь процес вимірювання;
  - дотримання розроблених методики і вимог проведення вимірювань та регулювання;
  - врахування та компенсації похибок АГ.

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						118
Змн.	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ (мовою оригіналу)

1. Арнаутов Г.П. и др. Неприливные изменения гравитационного поля Земли в разнесенных по долготе точках. - Доклады А.Н. СССР, 1985. – Том 280, №5. – с. 34-38.
2. Арнаутов Г.П. Оптические схемы абсолютных лазерных баллистических гравиметров. // Автометрия, 1998. - №6. – с. 53 – 63.
3. Безвесільна О.М. Вимірювання гравітаційних прискорень: Підручник для студентів приладобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів. - Житомир: ЖІТІ, 2002. – 264 с.
4. Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень. - К.: Либідь, 2001. – 241с.
5. Безвесільна О.М., Остапчук А.А. Автоматизований контроль вимірювання прискорення сили ваги за допомогою абсолютного балістичного гравіметра. - Вісник ЖДТУ № 1 (48), с. 79-84
6. Бондарев С.С., Бренер В.Н. и др. Экспериментальные исследования баллистических гравиметров. – Метрология, 1986. - №1. – с. 25-31.
7. Бренер В.Н. и др. Тезисы докл. II Всесоюзн. науч. конф.: Метрология в гравиметрии. – Харьков, 1984. – с. 61.
8. Буланже Ю.Д. Некоторые результаты изучения непрерывных изменений силы тяжести. – Доклад А.Н. СССР, 1981. – Том 256, №6.
9. Губаренко Л.А.. Разработка и исследования струнного гравиметра для измерения силы тяжести на подвижном основании: Автореф. дис. канд. техн. наук. - М., 1991,- 17с.; Делинджер Питер. Морская гравиметрия. - М.: Недра, 1993. - 312с.
10. Грушинский Н.П. Основы гравиметрии – М.: Наука, 1983. – 203 с.
11. Грушко И.М. Основы научных исследований / Грушко И.М., Сиденко В.М. // - Харьков: Вища школа, 1983. – 256с.
12. Дементьев В.Е. Современная геодезическая техника и ее применение. / Изд. 2-е. - М.: Академический проект, 2008. - 591с.
13. Дулит П.Д. Влияние неприливных изменений гравитационного поля

					<i>МД ПІ7114 ПЗ</i>	Арк
						119
Змн.	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата		

- Земли на результаты высокоточных геодезических измерений // Состояние и перспективы инженерно-геодезических и инженерно-фотограмметрических работ. – Москва, 1990. – С.30–34.
- 14.Двуліт П.Д. Гравіметрія. – Л.: ЛАГТ, 1998. – 195 с.
- 15.Двуліт П.Д. Методи врахування впливу геофізичних факторів на варіації гравітаційного поля Землі: Дис. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: 05.24.01. – Л., 1999. – 225 с.
- 16.Замберг М.Э. Транспортабельная аппаратура для абсолютных измерений ускорений силы тяжести. / Диссертация на соискание учёной степени доктора философии, отд. физики. Мичиган-Колорадо, США, 1976-1981.- Препринт МПУ, 1985. – 240 с.
- 17.Занимонский Е.М. Тезисы докл. П Всесоюзн. науч. конф. Метрология в гравиметрии. – Харьков, 1984. – с. 58.
- 18.Измерительный практикум. Учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2001. – с. 5-7.
- 19.Калиш Е.Н. Методы многих отсчетов в определении ускорения свободного падения. // Автометрия, 1982. - №2. – с 34-37.
- 20."Метрологія в гравіметрії": Тез. докл. 1-й всесоюз. науч.-техн. конф.- Харьков, 1980. – 275с.
- 21.Нобухико И. "Абсолютные измерения длинны волны стабилизированных лазеров" -Метрология и измерительная техника, 1985, №3, с. 31-37.
- 22.Огородова Л.В., Шимбирев Б.П., Юзефович А.П. Гравиметрия. - М.: Недра, 1978. – 325 с.
- 23.Сагитов М.У. - ДАН СССР, 1984. – Том 274, № 2. – с. 300.
- 24.Сагитов М.У., Харитонов С.В. Тезисы докл. П Всесоюзн. науч. конф.: Метрология в гравиметрии. – Харьков, 1984. – с. 77.
- 25.Худзинский Л.Л. О погрешности абсолютных измерений силы тяжести, связанной с низкочастотными вибрациями. // Электронный научно-

					МД ПІ7114 ПЗ	Арк
						120
Змн.	Арк	№докум.	Підпис	Дата		



информационный журнал “Вестник ОГТГГН РАН” №1(20) 2002. – с. 1-7.

26. Arnautov G. P. Measurement of the absolute magnitude of free fall acceleration by a laser ballistic gravimeter / G. P. Arnautov, L. D. Gick, V. P. Koronkevich [et al.] // Quantum electronics. – 1979. – Vol. 6, No 3. – pp. 560 - 567.
27. Koronkevich V. P., Arnautov G. P., Stus Yu. F. Absolute laser ballistic gravimeter – Novosibirsk: Preprint of IAE SB RAS of USSR, 1981. – No 196. – pp. 108 - 111.
28. Tideless measurements of the gravitational field of the Earth in longitudinally separates points / G. P. Arnautov, V. P. Koronkevich [et al.] // Reports of AS of USSR. – 1985. – Vol. 280. – pp. 1084 - 1086.

					МД ПІ7114 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ док-м.	Підпис	Дата		121